T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SANDVİÇ YAPILI KOMPOZİT PERVANE PALLERİNDE ÇEKİRDEK MALZEMENİN MEKANİK DAVRANIŞLARA ETKİSİ

Gürcan CANBAY

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Programı

Danışman

Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER

Eş Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Burçin ÖZBAY KISASÖZ

Şubat, 2023

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SANDVİÇ YAPILI KOMPOZİT PERVANE PALLERİNDE ÇEKİRDEK MALZEMENİN MEKANİK DAVRANIŞLARA ETKİSİ

Gürcan CANBAY tarafından hazırlanan tez çalışması 24.02.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Malzeme Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER	Dr. Öğr. Üyesi Burçin ÖZBAY KISASÖZ
Yıldız Teknik Üniversitesi	Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi
Danışman	Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Burçin ÖZBAY KISASÖZ, Eş-Danışman
Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi _____

Doç. Dr. Hale BERBER, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Gökhan ÖZER, Üye
Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Sandviç Yapılı Kompozit Pervane Pallerinde Çekirdek Malzemenin Mekanik Davranışlara Etkisi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Gürcan CANBAY

İmza

Aileme

ve

biricik eşime

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitimimiz boyunca mesleki bilgisini ve desteğini bizden esirgemeyen değerli hocalarımız Doç. Dr. Kerem Altuğ GÜLER'e, Dr. Öğr. Üyesi Burçin ÖZBAY KISASÖZ'e ve Prof. Dr. Ahmet KARAASLAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tezimizin deneysel çalışmalarında ve yazım aşamasında desteklerini esirgemeyen, bu tezin ortaya konmasında büyük emekleri olan Arş. Gör. Serhat ACAR'a ve Arş. Gör. Zekeriya CÖMERT'e teşekkür ederim. Ayrıca numunelerin imalatında otoklav desteği sağlayan Baykar Savunma ve çekirdek malzemelerin üretiminde desteğini esirgemeyen Burak PEKCAN'a ve infoTron 3B Teknolojiler'ine şükranlarımı sunarım.

Son olarak, bugünlere gelmemde büyük payları olan, maddi ve manevi desteklerini her daim eksik etmeyen aileme teşekkürü borç bilirim. Hayatımın her alanında olduğu gibi, tez çalışmamı hazırlarken de her aşamada bana yardımcı olan sevgili eşim Met. Malz. Malz. Müh. Hazal Nur ERDİNÇ CANBAY'a sonsuz teşekkür ederim.

Şubat, 2023

Gürcan CANBAY

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ ix
KISALTMA LİSTESİ x
ŞEKİL LİSTESİ xii
TABLO LİSTESİ xvi
ÖZET xvii
ABSTRACT xix
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti ... 1
1.2 Tezin Amacı ... 2
1.3 Hipotez ... 3
2 PERVANE PALİNİN GELİŞİMİ ve TASARIMI 4
2.1 Giriş ... 4
2.2 Hava Aracı Pervanelerinin Çalışma Prensibi ve Tarihsel Gelişimi ... 4
2.3 Pervane Palinin Tasarımı ... 6
3 KOMPOZİT MALZEMELER 9
3.1 Giriş ... 9
3.2 Kompozit Malzemelerin Genel Sınıflandırılması ... 11
3.2.1 Matris Malzeme Türüne Göre Kompozit Malzemeler ... 12
3.2.2 Takviye Geometrisine Göre Kompozit Malzemeler ... 14
3.2.3 Makro Görünümüne Göre Kompozit Malzemeler ... 15
3.3 Kompozit Malzemelerin Havacılık Endüstrisinde Kullanım Alanları ... 18
3.3.1 Havacılık Endüstrisinde Kompozit Uygulamaları ... 19
3.4 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri ... 22
3.4.1 Islak Serim El Yatırma Prosesi ... 23
3.4.2 Otomatik Bant (Şerit) Yatırma /Otomatik Fiber Yerleştirme (ATL/AFP) Prosesi ... 23
3.4.3 Filament Sarma Prosesi ... 25
3.4.4 Reçine Transfer Kalıplama (RTM) ... 26
3.4.5 Otoklav yöntemi ... 26
3.4.6 Prepreg Teknolojisi ... 27
4 POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER 29
4.1 Giriş ... 29
4.2 Polimer Matrisli Kompozitlerin Matris Malzemesine Göre Sınıflandırılması ... 30

4.2.1 Termoplastik Matrisli Malzemelerin Sınıflandırılması 31
4.2.2 Termoset Matrisli Malzemelerin Sınıflandırılması 34
4.3 Polimer Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özellikleri 38
4.4 Polimer Matrisli Kompozitlerde Fiber Malzeme Türüne Göre Sınıflandırılması 40
4.4.1 Cam Fiber-Takviyeli Polimerler (CFTP) 41
4.4.2 Karbon Fiber-Takviyeli Polimerler (KFTP) 43
4.4.3 Aramid Fiber-Takviyeli Polimerler (AFTP) 43
5 SANDVİÇ YAPILI KOMPOZİT MALZEMELER 45
5.1 Giriş 45
5.2 Sandviç Kompozitlerde Bileşenler 46
5.2.1 Çekirdek Malzemeler 46
5.2.2 Yüzey Malzemeler 52
5.3 Sandviç Yapılı Kompozitlerin Özellikleri 53
5.3.1 Sandviç Yapılı Kompozitlerin Uygulamaları 54
6 EKLEMELİ İMALAT TEKNOLOJİLERİ 55
6.1 Giriş 55
6.2 Havacılık Endüstrisinde Eklemeli İmalat 56
6.3 Polimer Eklemeli İmalat Teknolojisi 60
6.4 FDM (Fused Deposition Modeling) Teknolojisi 61
6.4.1 Malzemeler 62
6.5 GrabCAD Print&Insight Yazılımlarında Baskı Tasarımı 65
6.6 Ardıl İşlem ile Destek Malzemelerin Temizlenmesi 67
7 DENEYSEL ÇALIŞMALAR 69
7.1 Kullanılan Malzemeler 69
7.1.1 Yüzey Malzemesi 69
7.1.2 Çekirdek Malzemeler 70
7.2 Kullanılan Üretim Methodu ve Numunelerin Hazırlanması 73
7.2.1 Geleneksel İmalat ile Çekirdek Malzeme Üretimi 73
7.2.2 Eklemeli İmalat ile Çekirdek Malzeme Üretimi 74
7.2.3 Plaka Üretimi ve Test Numunelerinin Hazırlanması 78
7.3 Mekanik Deneyler 81
7.3.1 ASTM C393/C393M-20 Eğme Dayanım Deneyi 82
7.3.2 ASTM C365/C365M-22 Basma Dayanım Testi 83
7.4 Mikroskobik Görüntüleme 84

8 SONUÇ VE ÖNERİLER **85**
8.1 Ağırlık Ölçüm Sonuçları 85
8.2 ASTM C393/C393M-20 Eğme Deneyi 86
8.3 ASTM C365/C365M-22 Basma Deneyi 89
8.4 Mikroskobik Görüntüleme Sonuçlarının İncelenmesi 93
8.4 Sonuç ve Öneriler 93
KAYNAKÇA **102**
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **107**

SİMGE LİSTESİ

T_g	Camsı Geçiş Sıcaklığı
°C	Celcius Derece
$T_ç$	Çalışma Sıcaklığı
dk	Dakika
º	Derece
T_m	Ergime Sıcaklığı
ºF	Fahrenheit Derece
E_f	Fiber Elastiklik Modülü
σ_f	Fiber Gerilme Değeri
ε_f	Fiber Gerinim Değeri
GPa	Gigapaskal
g	Gram
J	Joule
kg	Kilogram
E_m	Matris Elastiklik Modülü
σ_m	Matris Gerilme Değeri
ε_m	Matris Gerinim Değeri
MPa	Megapaskal
m	Metre
mm	Milimetre
mol	Mol
N	Newton
cm	Santimetre

KISALTMA LİSTESİ

ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
AFP	Automated Fiber Placement
AFTP	Aramid Fiber-Takviyeli Polimerler
AIS	Aircraft Interior Solution
ATL	Automated Tape Laying
BMI	Bismaleimid
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım ve Taslak Çizimi
CFTP	Cam Fiber-Takviyeli Polimerler
DfAM	Eklemeli İmalat için Tasarım
DLP	Digital Light Processing - Dijital Işık İşleme
DYPE	Düşük Yoğunluklu Polietilen
Eİ	Eklemeli İmalat
ESD	Elektrostatik boşaltma
FDM	Fused Deposition Modelling
FFF	Fused Filament Fabrication – Eriyik Yığma Modelleme
FRP	Fiber takviyeli polimer
HEMA	Hidroksil Metakrilat-Poliüretan
İHA	İnsansız Hava Aracı
KFTP	Karbon Fiber-Takviyeli Polimerler
MMK	Metal Matrisli Kompozit
MS	Milattan Sonra
PAN	Poliakrilonitril
PBF	Toz Yataklı Füzyon
PC	Polikarbonat
PE	Polietilen
PEI	Polieterimid
PEEK	Polietereterketon
PEKK	Polieterketonketon

PES	Polietersülfon
PLA	Poliaktik Asit
PMI	Polimetakrilimid
PMK	Polimer Matrisli Kompozit
PP	Polipropilen
PPS	Polifeilensülfür
PS	Polistren
PTFE	Politetrafloroetilen
PU	Poliüretan
PVC	Polivinil klorür
RTM	Resin Transfer Molding
SAN	Stiren akrilonitril
SBR	Stiren-bütadien
SLA	Stereolitografi
SMA	Stiren-maleik anhidrid
SMK	Seramik Matrisli Kompozit
STL	Standart Üçgen Dili
TP	Termoplastik
TS	Termoset
UV	Ultraviyole
UYMAPE	Ultra Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen
YYPE	Yüksek Yoğunluklu Polietilen

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Metal ve kompozitten yapılmış 4 kanatlı pervane için ağırlık ve çap karşılaştırması [10]. 6

Şekil 2.2 Pervane kanadındaki dinamik yükler [10]..... 7

Şekil 3.1 Kompozit bileşenleri 9

Şekil 3.2 Fiberler ve matrisin yük altındaki davranışları..... 10

Şekil 3.3 Kompozit yapıda takviye ve matris fazlarının şematik gösterimi [17]. 10

Şekil 3.4 Kompozitlerin genel sınıflandırılması [22]. 11

Şekil 3.5 Kompozitlerin kompozisyonlarına göre sınıflandırılması [22]. 12

Şekil 3.6 Kompozit sistemler. (a) takviye türleri (b) lamine ve örgü yapıları [23]. 12

Şekil 3.7 Çeşitli PMK'ler, MMK'ler, SMK'ler için ashby diyagramı. (a) young modülüne karşı maksimum çalışma sıcaklığı (b) özgül mukavemet (çekme dayanımı/yoğunluk) karşı maksimum çalışma sıcaklığı [23]..... 13

Şekil 3.8 Sürekli fiber takviye a) tek yönlü, b) dokuma kumaş [28]..... 14

Şekil 3.9 Bir tabakalı kompozitin yapısal dizilişi [31]. 15

Şekil 3.10 Yarı-izotropik tabakalı kompozitin kat oryantasyon gösterimi [31]. 16

Şekil 3.11 Alüminyum alaşımından üretilmiş sandviç yapı [31]. 17

Şekil 3.12 Uçaktaki kompozitlerin genel dağılımı, 1- kapılar, 2- kanatçık, 3- motor, 4- iniş takımı, 5- zemin panelleri, 6- burun, 7- merdiven, 8- dahili hava frenleri, 9- yatay kuyruk, 10- dikey kuyruk [34]. 19

Şekil 3.13 Hava araçlarında ağırlıkça kullanılan kompozit malzemelerin yıllara göre dağılımı [35]..... 19

Şekil 3.14 Askeri hava araçlarında kompozit kullanımı [35]. 21

Şekil 3.15 Boeing 787 Dreamliner'da kullanılan çeşitli tiplerde malzemelerin konumları [36]. 22

Şekil 3.16 El yatırması yöntemi [36]..... 23

Şekil 3.17 Otomatik dar teyp yerleştirme tekniği..... 24

Şekil 3.18 Filament sarma prosesi [36]. 25

Şekil 3.19 Reçine transfer kalıplama yöntemi [36]. 26

Şekil 3.20 Sanayi tipi otoklav cihazı 27

Şekil 3.21 Prepreg teknolojisi, (a) prepreg serim, (b) tabakalı kompozit serim prosesi esnasındaki görüntüsü 28

Şekil 4.1 (a) optimum reçine sisteminin, (b) dört adet fiber malzeme türü ve epoksi bazlı reçinenin gerilme/gerinim eğrileri [39]. 30

Şekil 4.2 Polimer matrisler [31]. 30

Şekil 4.3 Polimer bazlı kompozitlerin sınıflandırma sistemi [31]. 31

Şekil 4.4 Termoset matrise sahip yapılarda bulunan çapraz bağların şematik gösterimi [43]. 35

Şekil 4.5 Yaygın kullanılan termoset matris malzemelerine ait kimyasal yapılar: a) Epoksi, b) Doymamış Polyester, c) Fenolik Reçine, d) Vinil ester [42]. 36

Şekil 4.6 Polyester'e ait kimyasal yapının şematik gösterimi [42]. 36

Şekil 4.7 Epoksi reçineye ait kimyasal yapının şematik gösterimi [44]. 37

Şekil 4.8 Vinil ester kimyasal yapısına ait şematik gösterimi [39]. 37

Şekil 4.9 Fiber takviyeli polimer matrisli kompozite ait gerilme-gerinim eğrisi [39]. .. 38

Şekil 4.10 Fiber (takviye) dokuma tipleri [47]. 41

Şekil 5.1 Sandviç yapılı kompozite ait bileşenlerinin şematik gösterimi 45

Şekil 5.2 Peteksi çekirdek malzemenin hücre tipleri [62]. 49

Şekil 5.3 Sandviç kompozitin örnek gösterimi 54

Şekil 6.1 Wohlers 2022 yılı eklemeli imalat raporuna göre sektörel uygulama oranları [6]. 56

Şekil 6.2 Wohlers 2022 raporuna göre eklemeli imalatın sektörel dağılımı [6]. 57

Şekil 6.3 (a) Stratasys üretimi modern bir uydu için tasarlanmış bir aviyonik kutusu (b) uydu görseli [9], [64]. 57

Şekil 6.4 F900 sistemi ile üretilmiş olan ambar kapağı üretimi ve kullanım yeri [9], [65]. 58

Şekil 6.5 Boom Supersonic üretim hattı (a) FDM teknolojisi ile üretilen parçaları (b) Ultem malzemeleri ile üretilen fikstür ve aparat denemeleri [9], [66]. 59

Şekil 6.6 Aurora insansız hava aracı, (a) Aurora insansız hava aracı, (b) Aurora insansız hava aracında Ultem 9085 malzeme ile üretilen kanat yapısalı [68]. 59

Şekil 6.7 ASTM/ISO 52900 standartına göre polimer eklemeli imalat için teknoloji haritası [69]. 60

Şekil 6.8 a) FDM Teknolojisi çalışma prensibi b) ekstrüzyon kafası [70]. 61

Şekil 6.9 Sıcaklık kontrollü nozul uç [72]. 62

Şekil 6.10 FDM model ve destek malzeme tasarımı [73]. 62

Şekil 6.11 Yüksek performanslı malzeme uygulama örnekleri a) anten b) gimbal muhafaza kabuğu [75]. 63

Şekil 6.12 FDM üretim süreci ve sonuçları (a) FDM proses parametreleri, (b) farklı proses parametrelerine göre mekanik dayanım farklılıkları [76-78]. 63

Şekil 6.13 Stratasys F900 ile üretilen Ultem1010 kanat parçası 64

Şekil 6.14 a) boşluklu takım yolu b) kontür adeti ve genişliği değiştirilmiş takım yolu c) parametre setleri [81]. 66

Şekil 6.15 a) dolu raster dolguları – zıt yönlerde çekmeye çalışan yükler çarpılmaya sebep olabilir, b) boşluklu (sparce) raster dolguları 67

Şekil 6.16 a) Destek kolonu eklenmiş numune takım yolu görüntüsü b) destek kolonu parametreleri program arayüzü..... 67

Şekil 6.17 Çözünebilir destek malzemesi (a) destekli üretilen parça, (b) çözündürücü tanka konulan parçalar [82]..... 68

Şekil 6.18 (a)Söküm için kullanılan aletler, (b)sökülebilir destek malzemesi [83]. 68

Şekil 7.1 Kompozit yapıda kullanılan çekirdek malzemeler..... 70

Şekil 7.2 Stratasys Fortus 450mc Cihazı..... 75

Şekil 7.3 CATIA numune tasarım görüntüleri (a)basma deneyi numune tasarımı , (b)eğme deneyi numune tasarımı..... 75

Şekil 7.4 GrabCAD Print'te üretilen çekirdek malzemelerin takım yolu görüntüsü, (a) Poliamid 12 (Nylon 12CF) test numunelerinine ait , (b) Poliamid 12 (Nylon 12CF) test numunelerinin iç katmanlarına ait yakınlaştırılmış, (c) Polieterimid (Ultem 1010) test numunelerinine ait , (d) Polieterimid (Ultem 1010) test numunelerinin iç katmanlarına ait yakınlaştırılmış..... 76

Şekil 7.5 %60 yoğunluğunda hekzagram iç doluluk yapısına sahip polieterimid çekirdek malzemenin mikroskop altındaki görüntüleri..... 76

Şekil 7.6 GrabCAD Print yazılım arayüzünde numune yan kesiti (a) taban yığını (raft), (b) destek malzemesi, (c) ana modelin katman görüntüsü..... 77

Şekil 7.7 GrabCAD Print'te hazırlanan üretim modellemeleri (a) basma test numunesine ait çekirdek malzeme, (b) eğme test numunesine ait çekirdek malzeme 78

Şekil 7.8 Vakum torbalama hazırlık aşaması..... 79

Şekil 7.9 Otoklav sistemi..... 79

Şekil 7.10 Otoklav kür çevrim (sıcaklık/zaman) grafiği..... 79

Şekil 7.11 Test numunelerinin kesiminde kullanılan testere..... 80

Şekil 7.12 Tek noktalı yükleme..... 82

Şekil 7.13 Mohr Federhaff AG marka eğme,basma ve çekme test cihazı..... 83

Şekil 7.14 Numune yüzeyine doğru kapanmakta olan test fikstürü..... 84

Şekil 8.1 S-AGH-4.8-64-A ve S-AGH-4.8-64 kısa kodlu sandviç yapılı kompozit numunelere ait yük/deplasman grafiği..... 87

Şekil 8.2 S-PEI kısa kodlu sandviç yapılı kompozit numuneye ait yük/deplasman grafiği 88

Şekil 8.3 S-AH-3.2-82 kısa kodlu sandviç yapılı kompozit numuneye ait yük/deplasman grafiği..... 90

Şekil 8.4 S-PEI (Ultem 1010) ve S-PA12 (Nylon 12CF) kısa kodlu sandviç yapılı kompozit numunenin basma gerilimi/deplasman grafiği..... 92

Şekil 8.5 S-AH-3.2-82 kodlu sandviç yapılı kompozit numunenin basma testindeki hasar görüntüsü..... 93

Şekil 8.6 S-AH-3.2-82 kodlu sandviç yapılı kompozit numunenin eğme testindeki hasar görüntüsü..... 94

Şekil 8.7 S-PMI ve S-PVC numunelerinin basma testi sonrası kesit incelemesi a) S-PMI yan kesit görüntüsü b) S-PVC yan kesit görüntüsü..... 94

Şekil 8.8 S-PVC kodlu sandviç yapılı kompozit numunenin basma testinden sonucunda oluşan hasar görüntüsü 95

Şekil 8.9 S-PMI ve S-PVC numunelerinin eğme testi sonrası kesit incelemesi a) S-PMI yan kesit görüntüsü b) S-PVC yan kesit görüntüsü..... 96

Şekil 8.10 S-PEI (Ultem 1010) numunesinin kırılan bölge incelemesi a) yan kesit görüntüsü b) ön kesit görüntüsü..... 97

Şekil 8.11 S-PEI kodlu numuneye ait çekirdek malzemenin 5x'deki yapı görüntüsü a)boşluk ve kontur b) tarama (raster) c) yan kesit görüntüsü 98

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 Kompozit malzemelerin bazı önemli avantajları ve dezavantajları [17], [19]. 10

Tablo 3.2 Hava aracında epoksi matrisli kompozitlerin kullanımı [5]. 20

Tablo 3.3 Boeing 787 ve 777 hava araçlarının malzeme tipleri ve kullanım oranları [36]. 21

Tablo 4.1 Bazı örnek termoplastik bazlı polimerler ve özellikleri [41]. 32

Tablo 4.2 Termoplastik malzemelerden bazılarının karakteristik özellikleri [41]. 34

Tablo 4.3 Tek yönlü epoksi matrisli kompozite ait mekanik özellikleri 39

Tablo 4.4 Bazı yarı izotropik polimer matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri 40

Tablo 4.5 Cam fiber türlerinin oksit içerikleri [48]. 41

Tablo 4.6 Bazı cam fiber türlerine ait mekanik özellikler [49]. 42

Tablo 4.7 Fiber takviyeli polimer matrisli kompozitlerin fiber türlerine göre tipik özellikleri 44

Tablo 5.1 Sandviç yapılı kompozit malzemelerin bazı avantaj ve dezavantajları [53]. 54

Tablo 6.1 Ultem 1010 ile Nylon 12CF malzemelerinin özellikleri [80]. 65

Tablo 7.1 Kullanılan fiber malzemelerin özellikleri 69

Tablo 7.2 Yapısal köpüklerin özellikleri 71

Tablo 7.3 Bal peteği yapılarının özellikleri 71

Tablo 7.4 Yüksek mukavemetli termoplastik malzemelerin özellikleri 72

Tablo 7.5 Ultem 1010 ve Nylon 12CF malzemelerinin üretim parametreleri 77

Tablo 7.6 Test plakalarına ait numunelerin kısa kodlandırılması 80

Tablo 7.7 Üretilen kompozit numunelere uygulanan deneyler ve standartları 81

Tablo 8.1 Sandviç yapılı kompozitlerin eğme deney numunelerinin ortalama ağırlık ölçümleri 85

Tablo 8.2 Sandviç yapılı kompozitlerin basma deneyi numunelerinin deney öncesi ağırlık ölçümleri 85

Tablo 8.3 Sandviç yapılı kompozitlerin çekirdek malzeme tiplerine göre eğme deneyi sonuçları 86

Tablo 8.4 Sandviç yapılı kompozitlerin kullanılan çekirdek malzeme tiplerine göre uygulanan yük ve basma dayanım değerleri 89

Tablo 8.5 Sandviç yapılı kompozitlerin kullanılan çekirdek malzeme tiplerine göre basma dayanım değerleri 91

ÖZET

Gürcan CANBAY

Metalurji Malzeme Mühendisliği Bölümü

Malzeme Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER

Eş-Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Burçin ÖZBAY KISASÖZ

Sandviç yapılı kompozitler, yüksek özgül mukavemet ve ağırlıkta önemli bir artış olmaksızın artan eğilme mukavemeti nedeniyle çok popüler hale gelen özel bir kompozit malzeme sınıfıdır. Bu yapılar düşük yoğunluklu çekirdek malzemelere sert ve güçlü yüzey malzemelerinin yapıştırılması veya birlikte kürlenmesi sonucu oluşturulurlar.

Eklemeli imalat yoluyla üretilen polimer matrisli kompozitler, özellikle havacılık ve savunma sanayi gibi alanlardaki uygulamalar için, sağladığı düşük ağırlık ve geometrik karmaşıklıkta yüksek tasarım özgürlüğü sayesinde daha çok ilgi kazanmaya başlamıştır. Öte yandan ekstrüzyona dayalı prosesler kullanılarak, sandviç yapılı kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için yüksek performanslı termoplastik parçalar tasarlanabilir ve uygulanabilir.

Sandviç yapılı kompozit malzemede dış katmanlar haricinde farklı çekirdek malzeme türü kullanılarak sandviç yapının mekanik özellikleri arttırılabilir. Bu çalışmada dış katmanlar sabit laminasyon kalınlığa sahip 0/90° yönlü laminasyon oryantasyonunda 4 kat CD245 prepreg ile üretilmiştir. Çekirdek malzeme olarak genişletilmiş peteksi yapı, hekzagonal peteksi yapı, Polimetakrilimid, Polivinil klorür köpükler ile 3 boyutlu yazıcıdan üretilen

Polieterimid ve karbon fiber takviyeli Poliamid 12 kullanılmıştır. ASTM C393, ASTM C365 standartlarında test edilmiş ve sandviç yapının hasar alan bölgelerinin karakterizasyonları yapılmıştır.

Bu çalışmada, aerodinamik yükleme altında geniş bir hız aralığında çalışan, daha hafif bir kompozit pervane palinin tasarımına yönelik optimum dayanım sağlamak amacıyla Polieterimid ve fiber takviyeli Poliamid 12'nin, geleneksel çekirdek malzeme olan genişletilmiş peteksi yapı, hekzagonal peteksi yapı, Polimetakrilimid ve Polivinil klorür yapısal köpükleri ile elde edilen numunelerin mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Dış yüzeydeki eğme gerilimi 7,16 MPa ve çekirdek malzemeye ait kayma gerilmesinde 286,55 MPa değerleri ile maksimum dayanımı Polieterimid çekirdek malzemesi ile üretilen sandviç yapılı kompozit malzeme sağlamaktadır. Özgül basma dayanımları incelendiğinde S-AH-3.2-82 kodlu sandviç yapılı kompozit numunenin maksimum 8,21 kN.m/kg değeri ile düşük ağırlıkta üstün basma dayanım değeri elde edilebildiğini göstermektedir.

Bunlara ek olarak üretilen numunelerin mikroskobik görüntüleme incelemesi yapılmıştır. Elde edilen veriler sonucunda kompozit pal imalatına yönelik incelenen çekirdek malzeme türlerinin kıyaslaması yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sandviç Yapılı Kompozitler, eklemeli imalat, çekirdek malzeme, Ultem 1010, Nylon 12CF.

ABSTRACT

The Effect of Core Material on Mechanical Behavior in Sandwich Composite Propeller Blades

Gürcan CANBAY

Department of Metallurgical Materials Engineering

Materials Department

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER

Co-supervisor: Asst. Prof. Dr. Burçin ÖZBAY KISASÖZ

Sandwich-structured composites are a special class of composite materials that have become very popular due to their high specific strength and increased flexural strength without a significant increase in weight. These structures are formed by bonding or co-curing strong surface materials to low-density core materials.

Polymer matrix composites produced by additive manufacturing have started to gain more attention, especially for aerospace and defense industries, thanks to their low weight and design freedom with geometric complexity. High-performance thermoplastic parts can be designed and applied to improve the mechanical properties of sandwich-structured composites in using extrusion-based processes.

In this study, outer layers were produced with 4 layers of CD245 prepreg in $0/90^{o}$ directional lamination orientation with constant lamination thickness. Over-expanded and hexagonal honeycomb, Polymethacrylamide and Polyvinyl Chloride foams, Polyetherimide, Polyamide 12 reinforced with carbon fiber produced from 3D printer

were used as core materials. It has been tested in ASTM C393, ASTM C365 standards and the damaged areas of the sandwich structure have been characterised.

The mechanical properties of the samples obtained with over-expanded honeycomb, hexagonal honeycomb, Polymethacrylamide foam, Polyvinyl Chloride foam were compared. The sandwich-structured composite material produced with Polyetherimide material provides a maximum strength of 7.16 MPa in bending stress on the outer surface and 286.55 MPa in shear stress of the core material. It has been determined that the sandwich-structured composite with S-AH-3.2-82 code, with a maximum specific compressive strength value of 8.21 kN.m/kg, has a better compressive strength value than other materials.

In addition to these, microscopic imaging examination of the samples was made. A comparison of the core material types examined for the production of composite blades was made.

Keywords: Sandwich Structured Composites, additive manufacturing, core material, Ultem 1010, Nylon 12CF.

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

20. yüzyılın başlarında, uçak pervaneleri, Robert Hartzell tarafından ilk uçak 'Wright Flyer'da uygulanması üzerine icat edildikten sonra havacılık endüstrisinde önemli bir rol oynamıştır. Bu tarihten itibaren daha verimli pal tasarımları yapabilmek için çeşitli çalışmalar yapılmış olup farklı malzemeler kullanılarak üretimleri de yapılmıştır [1-3]. Son zamanlarda, yüksek petrol fiyatlarına karşılık çevre dostu bir gereklilik olarak, yakıt verimliliği artırılmış çevre dostu tahrik sistemleri geliştirme ihtiyacı doğmuştur. Ayrıca karbon emisyon miktarlarında hava araçları dünya genelinde emisyon miktarını %3-5'lik bir kısmını oluşturmaktadır. Bu durum uçakların yakıt verimliliğini ve aerodinamik performansını artırmak için çevre dostu ve yüksek yakıt verimliliğine sahip tahrik teknolojisinin geliştirilmesi zorunlu bir durum haline getirmiştir [4]. Kompozit malzemelerin pervane pallerinde kullanılması daha iyi sönümleme özelliği, yüksek yorulma ömrü ile sonuçlanan harici kaynaklardan oluşan titreşimleri ise azaltıcı yönde bir etkiye sahiptir [1-3]. Bu nedenle çalışmalar zaman içerisinde kompozit malzemelere ve devam eden süreçte sandviç yapılı kompozit denemelerine odaklanmış zamanla da üretim hatlarında yerlerini almıştır. Günümüzde de hala ihtiyaca göre çeşitli malzemeler üzerine çalışmalar yapılmaktadır.

Sandviç yapılı kompozitler, yüksek özgül mukavemet ve ağırlıkta önemli bir artış olmaksızın artan eğilme mukavemeti nedeniyle çok popüler hale gelen özel bir kompozit malzeme sınıfıdır. Sandviç yapılar, başta havacılık olmak üzere denizcilik, otomotiv ve mimari uygulamalarında hafif çözümler olarak yaygın şekilde kullanılmakta ve küresel bileşik pazar alanlanları bulmaktadır [5]. Bu yapılar düşük yoğunluklu çekirdek malzemelere sert ve güçlü yüzey malzemelerinin yapıştırılması veya birlikte kürlenmesi sonucu oluşturulurlar.

Diğer bir taraftan son yıllarda havacılık sektörüne hızlı bir giriş yapan ve yüksek mekanik davranışlara sahip, hızlı üretim imkânı veren 3 boyutlu yazıcı malzemeleri de önem kazanmaktadır. Yeni endüstriyel devrim olarak tanımlanan Endüstri 4.0'ın önemli bir bileşeni olan 3 boyutlu yazıcıların uygulamaları birçok sektörde önemli bir çalışma alanı

haline gelmiş bulunmaktadır. Bu teknoloji, her ne kadar günlük hayatta 3 boyutlu yazıcı şeklinde ifade edilse de teknolojik düzeyde katmanlı imalat veya eklemeli imalat ifadeleri daha yaygın olarak kullanılmaktadır [6-8]. Geleneksel yöntemler ile üretilmesi zor ya da imkânsız olan karmaşık şekilli parçaların kısa sürede üretilmesi, nihai ürün için gerektiği kadar malzeme kullanımı ile malzeme kayıplarının önlenmesi, montajlı parçaların tek seferde üretiminin gerçekleştirilerek işçilik maliyetlerinin azaltılması, kalıba ihtiyaç duyulmadan kişiye özgü parçaların üretimine imkân vermesi eklemeli imalat teknolojilerinin genel anlamda ortaya konan en önemli avantajlarıdır. Eklemeli imalat teknolojileri ülkelerin stratejik anlamda önde gelen araştırma konularından birini oluşturmaktadır. Bu doğrultuda tüm dünyada gerek akademik gerekse de firma düzeyinde önemli yatırımlar yapılmaktadır [6], [7], [9].

Eklemeli imalat küresel olarak birçok farklı sektörde uygulama alanları bulmuştur [6]. Bu imalat yöntemi yoluyla üretilen polimer matrisli kompozitler, özellikle havacılık ve savunma sanayi gibi alanlardaki uygulamalar için, sağladığı düşük ağırlık ve geometrik karmaşıklıkta yüksek tasarım özgürlüğü sayesinde daha çok ilgi kazanmaya başlamıştır. Öte yandan ekstrüzyona dayalı prosesler kullanılarak, sandviç yapılı kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için yüksek performanslı termoplastik parçalar tasarlanabilir ve uygulanabilir.

Sandviç yapılı kompozit malzemede dış katmanlar haricinde farklı çekirdek malzeme türü kullanılarak sandviç yapının mekanik özellikleri arttırılabilir. Bu çalışmada dış katmanlar sabit laminasyon kalınlığa sahip $0/90^{o}$ yönlü laminasyon oryantasyonunda 4 kat CD245 prepreg ile üretilmiştir. Sandviç yapılı kompozit imal edilirken çeşitli çekirdek malzemeleri kullanılmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmada daha geniş bir hız aralığında çalışan bir kompozit pervane palini tasarlamak için kompozit pal imalatına yönelik malzeme tasarımı yapılırken kompozit pal imalatında geleneksel imalat yöntemlerinin mekanik isterleri referans alınmıştır. Yenilikçi imalat yöntemi olan eklemeli imalat teknolojisi ile çekirdek malzeme imal edilip uygulanabilirliği üzerinde çalışma yapılmıştır. Optimum çekirdek malzemesinin belirlenmesi amacıyla eklemeli ve geleneksel imalat yöntemleri ile üretilen çekirdek malzemeleri kullanılarak oluşturulan sandviç yapılı kompozilerde çekirdek malzemenin yapıya etkisi incelenmiştir.

1.3 Hipotez

Pervane pallerinde metal malzemelerin kullanılması farklı uçuş şartları esnasında hava aracının büyük titreşimlere sebep olmasının yanında tamir edilebilirliğinin kompozit malzeme kullanılan pallere göre daha az olması ve hasara karşı az toleranslılık gibi nedenlerden dolayı daha geniş bir hız aralığında çalışan pervane palleri için kompozit malzeme ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada kompozit pal imalatına yönelik malzeme tasarımı yapılırken optimum çekirdek malzemesinin belirlenmesi amaçlanmaktadır.

Sandviç yapılı kompozitlerde bulunan çekirdek malzemelerin geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla eklemeli imalat teknolojisi ile üretilen yapılarda hem karmaşık formların tasarlanılabilir hemde dayanım özellikleri arttılabilir. Bu bağlamda geleneksel imalat yöntemleri ile üretilen çekirdek malzemelerinin sandviç yapılı kompozitlerde mekanik olarak etkisi referans alınarak yenilikçi bir teknoloji olan eklemeli imalat ile üretilen Ultem 1010 ticari isimli polieterimid ve Nylon 12CF ticari isimli poliamid 12 malzemelerinin sandviç yapılı kompozitlerde çekirdek malzeme olarak kullanımı, geleneksel yöntemler ile imal edilen çekirdek malzemelerin kullanımına kıyasla yapının mukavemet değerlerini arttırması ve FDM (fused deposition modelling) ile özgün tasarım uygulanarak kompozit pervane palinin üretiminde yenilikçi bir yaklaşım yapması ön görülmüştür.

2
PERVANE PALİNİN GELİŞİMİ ve TASARIMI

2.1 Giriş

Son zamanlarda, yüksek petrol fiyatlarına karşılık çevre dostu bir gereklilik olarak, yakıt verimliliği artırılmış çevre dostu tahrik sistemleri geliştirme ihtiyacı doğmuştur. Hava araçları, dünya karbondioksit emisyon miktarının %3-5'ini oluşturmakta olup tek bir sektör olarak karbon emisyon miktarında havacılık endüstrisi ilk sırada yer almaktadır. Yüksek irtifa atmosferinde salınan karbondioksit miktarı, dünyadaki tüm araçların boşalttığı karbondioksit miktarından daha fazladır. Bu nedenle, karbondioksit emisyon miktarını azaltmak amacıyla uçakların yakıt verimliliğini ve aerodinamik performansını artırmak için yeni nesil çevre dostu ve yüksek yakıt verimliliğine sahip tahrik teknolojisinin geliştirilmesi gerekmektedir. Gelişmiş bir turboprop uçak için pervane palinin, çeşitli uçuş şartlarında aerodinamik eğilme, burulma ve kesme, merkezkaç kuvveti, titreşim vb. çeşitli kritik yüklere dayanmalıdır [4]. Bu nedenle, bu çalışmada hafifliğin iyileştirilmesi için yüksek sertlik ve mukavemetli karbon/epoksi kaplama-çekirdek malzeme destekli sandviç tip yapı benimsenmiştir. Bu paldeki malzemelerin kombinasyonu, bir çekirdek ve bir dış yüzey elemanından oluşur, burada çekirdek daha güçlü bir taşıma elemanı olarak işlev görürken, dış kısımda, çekirdeğe koruma sağlamak için belirli sayıda kompozit kumaş serimi yapılır. Bu sayede hem mukavemetsel açıdan taşıyıcı destek sağlanmış olup hem de çekirdek malzemenin korozif dış ortamdan korunmasını sağlanmaktadır [1], [4].

2.2 Hava Aracı Pervanelerinin Çalışma Prensibi ve Tarihsel Gelişimi

Bir uçağa ait pervane yapısalının çalışma prensibini açıklayan Mohamed A. Fouad Kandil'e göre, pervane kanadının kendi ekseni etrafında dönüşü sırasında, palin daha yüksek basınç bölgesine doğru hareket etmesini sağlayan asimetrik pal kesiti nedeniyle palin her iki yüzeyi arasında bir basınç farkı oluşmakta ve böylece uçağı ileri doğru

hareket etmesi sağlanmaktadır. Bir uçağın pervanelerinin pal yapısı, hava aracının yüksek irtifalara ulaşılmasına yardımcı olmaktadır [1].

20. yüzyılın başlarında, uçak pervaneleri, Robert Hartzell tarafından ilk uçak 'Wright Flyer'da uygulanması üzerine icat edildikten sonra havacılık endüstrisinde önemli bir rol oynamıştır. Bu tarihe kadar pervaneler, birden fazla gereksinim ile verimli uçuş tahriki için kullanılmıştır. Pervanelerin tasarımı, yapısal, aerodinamik, konumlandırma ve kombinasyon yönleri ile birlikte çeşitli katma değer, özünde değişken hatve, geçiş yumuşatma ve geri dönüşlü hatve mekanizması açısından teknolojik olarak geliştirilmiştir. Bu optimizasyonlar, akrobatik manevra için hafif nakliye uçaklarının yanı sıra toplu nakliye, çok amaçlı ağır askeri uçakları da içeren çok çeşitli hava araçlarının daha uzun mesafeleri katetmesini sağlamıştır [1].

Wright Kardeşlerin ilk "uçan makineleri" için pervane yapımında ahşap gibi doğal malzemeler kullanılmıştır. Bu tarihten itibaren ahşap pervaneler kullanılmaya başlasa da, masif ahşap pervaneler çok hızlı bir şekilde yerini lamine edilmiş ahşaptan yapılan pervanelere bıraktı. Burada ahşabın damarı gerekli olan sertlik ve mukavemet değerlerini sağlaması için gerekli yönlerde hizalanarak üretimi yapılmıştır. Aynı uygulama, modern güçlendirici fiberler kullanan bileşenlerin tasarımında da kullanılır [2].

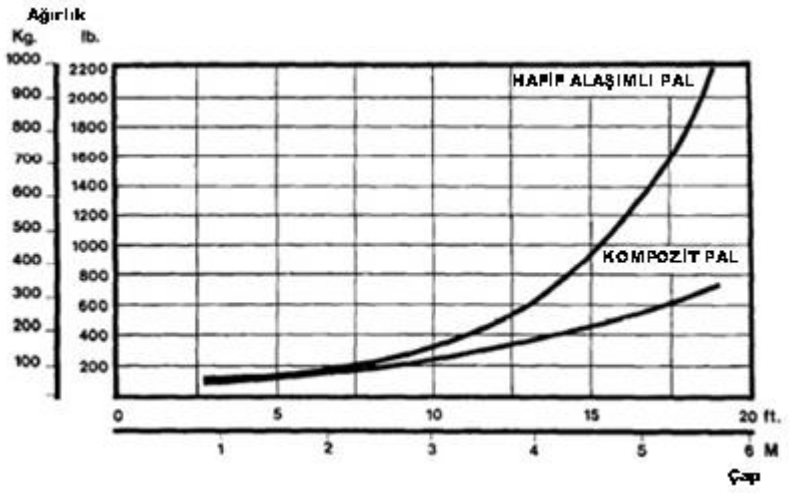
Mevcut kısa mesafeli uçak uygulaması senaryosunda, pervanelerin çoğu, operasyon sırasında oluşan yapısal yükün çoğunu taşıyan pal geometrisinde alüminyum alaşımları kullanılması tercih edilmiştir. Ahşap pervane palleri II. Dünya Savaşı sırasında kullanılmış, ancak yüksek özgül mukavemet sundukları için piyasada metalik alaşımlı parçaların ortaya çıkması nedeniyle üretimi durdurulduğu için bu pal türü üzerinde daha fazla araştırma yapılmamıştır [1-3].

Metallerin kullanılması farklı uçuş şartları esnasında bir hava aracının uçuş güvenliğini bozan büyük titreşimlere neden olur. Alüminyum alaşımları, yüksek sertlik sundukları için bir uçakta pervane yapımında kullanılmaktadır. Ancak kompozit teknolojisinin tanıtılmasından sonra havacılık endüstrisi, metal malzemelerden çeşitli kompozit malzemelere dönmüştür. Bunun nedeni, yapıyı yapmak için kompozitlerin kullanılmasının, bir uçağın toplam ağırlığını azaltarak, daha fazla yöne bağlı rijitlik ile maksimum kalkış ağırlığının artmasına neden olmasıdır. Bununla birlikte yüksek özgül mukavemet ve modüle sahip olduğu için kompozit yapılı pervaneler metalik pervanelere göre daha çok tercih edilmeye başlanmıştır [1-3].

Kompozit malzeme, mühendislik ürünü ahşap çekirdek ile birlikte kullanıldığında, geliştirilmiş sönümleme ve daha fazla sertlik ile dinamik özellikler sunmaktadır. Daha iyi sönümleme özellikleri, daha yüksek yorulma ömrü ile sonuçlanan harici kaynaklardan oluşan titreşimleri ise azaltıcı etkiye sahiptir [1-3].

2.3 Pervane Palinin Tasarımı

İlk olarak, pervane kanatlarında karbon fiber kullanımı düşünüldüğünde, ortaya çıkan tasarımların eşdeğer geleneksel pallere göre kayda değer ağırlık tasarrufu sağlaması gerektiği varsayılmıştır. Aşırı pahalı olmamalılar, bu nedenle ayrıntılı imalat yöntemleri kullanılmamalı ve palin kök tasarımını kısıtlayan mevcut göbeklerden palin değiştirilebilir olması gerekmektedir. Tüm tasarım çalışmaları bu hedefler doğrultusunda sürekli göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Alüminyum alaşımı ile karşılaştırıldığında dört kanatlı kompozit pervanelerin sonuçta ortaya çıkan potansiyel ağırlık tasarrufu Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



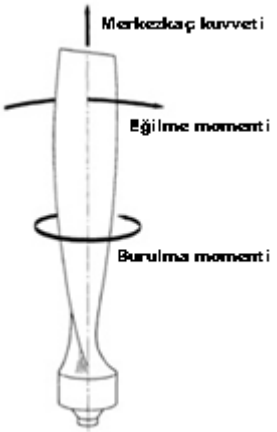
Şekil 2.1 Metal ve kompozitten yapılmış 4 kanatlı pervane için ağırlık ve çap karşılaştırması [10].

Böyle bir kanadın tasarımında, iki ana problem alanı tanımlanabilir: kanat kanadının (A) yapısı ve spardan metal köke yük transferi (B).

A kapsamında öncelikle şunları göz önünde bulundurmak gerekir:

- Sabit stres merkezkaç kuvveti, itme-eğilme momenti, eğilme;
- Salınım gerilmeleri - burulma, eğilme;
- Kanat frekansları – temel ilkeler ve harmonikler, burulma.

Ana kuvvetler Şekil 2.2'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Pervane kanadındaki dinamik yükler [10].

B altında dikkate alınması gereken ana öğeler şunlardır:

- Sabit yükler dentrifüj kuvveti, itme eğilme momenti,
- Salınımlı yükler - pal eğilmesi,
- Adım değişimi yükleri - merkezkaç burulma momenti, aerodinamik burulma momenti.

Genel tasarım açısından, kompozit pallerin alüminyum alaşımlı pallere göre bir takım avantajlara sahip olduğu bulunmuştur:

- Alüminyum alaşımına kıyasla düşük ağırlık,
- Azaltılmış kontrol adım anları,
- Yorulma çatlaklarına daha az duyarlı,
- Hasara karşı çok toleranslılık,
- Kolay tamir edilebilirlik [2].

Uçak bileşenlerinde kompozitlerin kullanımı için başlıca etkenler şunlardır:

- Hava aracının bileşenin verimliliğini ve aynı zamanda sistem verimliliğini doğrudan etkileyen ağırlığın azaltılması,

- Maliyet azaltma - bakım kolaylığı ile bakım-onarım maliyeti, tamir edilebilirliği ve bunlarla birlikte üretim maliyeti hesaba katıldığında,
- Yorulma dayanımı,
- Darbe dayanımı,
- Geliştirilmiş performans - Bileşen şeklini, biçimini ve sertliğini optimize etme yeteneği ile geliştirilebilir [2].

Lamine polimer matrisli kompozitlerden yapılan yapısal bileşenler, darbe yüklemesinin neden olduğu çeşitli kusurlara karşı hassastır. Birçok uygulamada, darbe yüklemesinin (mermiler, taşlar, parçalar, vb.) neden olduğu kalınlık boyunca oluşabilecek çatlaklar veya delikler, kırılma mekaniği şartlarında süreçte yol açılabilecek en tehlikeli hasar başlatıcılar olarak ele alınmalıdır. Bu gibi durumlarda, lamine kompozit yapılar için hasara dayanıklı tasarımda tolere edilebilir kusur boyutunun tahmini önemli bir rol oynar [11]. Bununla birlikte, bilgisayar destekli analiz teknikleriyle birleştirilmiş modern malzemelerin tekdüzeliği, hafif pervane kanatlarının tasarımı ve imalatında daha fazla gerçekçi ön izlenim vermektedir [2].

Geleneksel pervaneler, yüksek sertlikte metal malzemeden yapılmıştır. Sadece hafifçe deforme olurlar ve genellikle sabit bir hızda çalışmak üzere tasarlanırlar, diğer hızlarda düşük verimlilikte çalışırlar. Pervanenin deformasyonu, metalden yapılanlardan daha verimli pervaneler üretmek için fiberlerin yönlendirilmesiyle belirlenir [12].

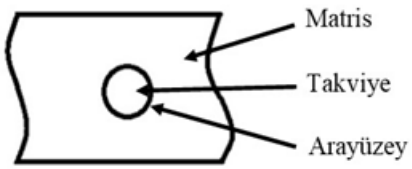
Bu çalışmada daha geniş bir hız aralığında çalışan bir kompozit pervane tasarlamak amacıyla, kompozit pal imalatına yönelik malzeme tasarımı yapılırken optimum çekirdek malzemesinin belirlenmesi ve kompozit pal imalatı için sandviç yapılı kompozilerde çekirdek malzemenin yapıya etkisi incelenmiştir.

3
KOMPOZİT MALZEMELER

3.1 Giriş

Kompozit malzemeler, tek bir malzemenin özelliklerini taşıyan ancak kimyasal olarak farklı iki veya daha fazla bileşenden oluşan malzemelerdir. Bir veya daha fazla süreksiz fazın sürekli bir faza dağıtılmasıyla elde edilir. Süreksiz faz, genellikle sürekli fazdan daha iyi özelliklere sahip olduğu için takviye olarak adlandırılır ve sürekli faz, matris olarak adlandırılır [13]. Bahsi geçen fazların şematik gösterimi Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

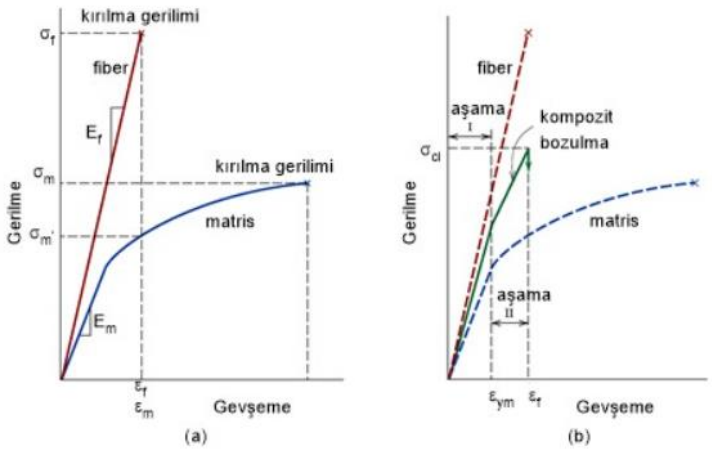
Matris malzemesinin rolü, takviye malzemesini bir arada tutmak, malzemenin biçimsel bütünlüğünü korumak ve uygulanan herhangi bir kuvveti, tahribata uğramadan, ara yüzey bağıyla takviye malzemesine iletmek ve dağıtmaktır. Takviye malzemesinin görevi, matris malzemesinin özelliklerini geliştirmek ve matris malzemesi tarafından aktarılan yükleri ara yüzey aracılığıyla iletmektir [14], [15].



Şekil 3.1 Kompozit bileşenleri

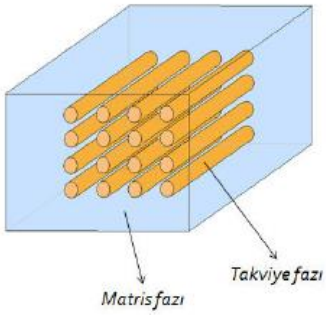
Matris ile takviye malzemesi arasında bir bağlantı görevi gören arayüzey, genellikle kırılgan olmasına rağmen, İletilen tüm kuvvetleri kırılmadan hatasız taşıyarak takviye fazına iletimini sağlamaktadır. Bu bölge, malzemenin elastisite modülünü etkileyen en önemli bölgedir. Bu nedenle, kompozit malzemenin dayanıklılığı istenen arayüzey bağına bağlıdır [16].

Bir kompozit malzemenin mekanik özellikleri, yapıyı oluşturan matris ve takviye malzemelerinin özellikleri, bunların hacim oranı, aralarındaki bağın özellikleri, kompozit yapı içindeki yönlenmesi, takviye malzemesinin şekli ve yapısı gibi çeşitli değişkenlere bağlıdır [15]. Bu durum Şekil 3.2'de ki grafiklerde verilmiştir.



Şekil 3.2 Fiberler ve matrisin yük altındaki davranışları

Matris ve takviye fazından oluşan kompozit malzemenin yapısı Şekil 3.3'te şematik olarak gösterilmektedir [17].



Şekil 3.3 Kompozit yapıda takviye ve matris fazlarının şematik gösterimi [17].

Kompozit malzemeler, takviye elemanı ile matris elemanı kombinasyonu sayesinde tanımlanan çok önemli özelliklere sahiptir. Özelliklerden bazıları; hafiflik, yüksek dayanıklılık ve yüksek modüldür. Kompozit malzemeler genellikle mükemmel özellikleri ile bilinmesine rağmen, yüksek maliyetleri, üretim güçlükleri ve mükemmel işçilik gerektiren üretim yöntemleri nedeniyle daha geniş alanlarda kullanımları sınırlıdır [18]. Tablo 3.1, kompozit malzemelerin ana avantajlarını ve dezavantajlarını göstermektedir.

Tablo 3.1 Kompozit malzemelerin bazı önemli avantajları ve dezavantajları [17], [19].

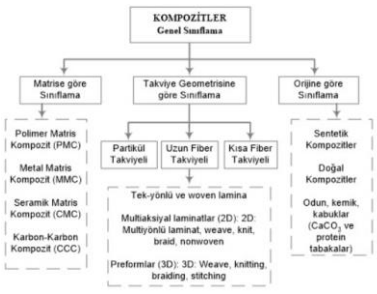
Avantaj	**Dezavantaj**
İyi mukavemet	Zor üretilebilirlik

Tablo 3.1 Kompozit malzemelerin bazı önemli avantajları ve dezavantajları [17], [19]. (devamı)

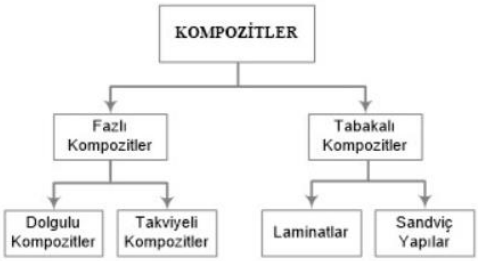
Tokluk	Bakım onarım güçlüğü
Yüksek yorulma mukavemeti	Yüksek hammadde fiyatı
Yüksek aşınma, kimyasal ve korozyon dayancı	Düşük geri dönüştürülebilirlik
Hafiflik	Düşük kopma uzaması
Rijitlik	İşlenme zorluğu
Isıl dayanım	Hammadde raf ömrünün sınırlılığı

3.2 Kompozit Malzemelerin Genel Sınıflandırılması

Kompozitler, arzu edilen özelliklere göre bir matris ile takviye malzemesinin birleştirilmesiyle elde edilmektedir. Bu doğrultuda takviye ve matris yapıları dikkate alındığında; matris tipi, takviye tipi ve makro görünümüne göre temelde 3 ana başlıkta genel olarak sınıflandırılır. Şekil 3.4, kompozit malzemelerin en sık karşılaşılan biçimleriyle sınıflandırılmasını göstermektedir [20-22]. Şekil 3.5'de ise kompozit malzemelerin kompozisyonlarına göre sınıflandırılması gösterilmiştir.

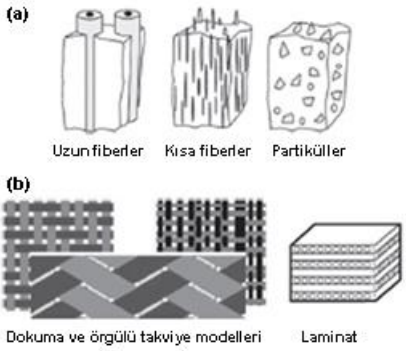


Şekil 3.4 Kompozitlerin genel sınıflandırılması [22].



Şekil 3.5 Kompozitlerin kompozisyonlarına göre sınıflandırılması [22].

İlk sınıflandırma seviyesi genellikle matris bileşenine göre yapılır. Bu, kompozitleri üç ana kategoriye ayırır: polimer matrisli kompozitler (PMK'ler), metal matrisli kompozitler (MMK'ler) ve seramik matrisli kompozitler (SMK'ler). İkinci sınıflandırma seviyesi, takviyenin biçimine atıfta bulunur: süreksiz (parçacık, kıl veya kırpık), sürekli lif veya dokuma (örgülü veya örgülü lif mimarileri bu sınıflandırmaya dahildir). Dokuma ve örgülü kompozitler söz konusu olduğunda, örgü veya örgü modeli (örn. düz örgü, üç eksenli örgü) de sıklıkla belirtilir. Bu tür kompozitlerden bazılarının örnekleri Şekil 3.6'da gösterilmektedir [23].



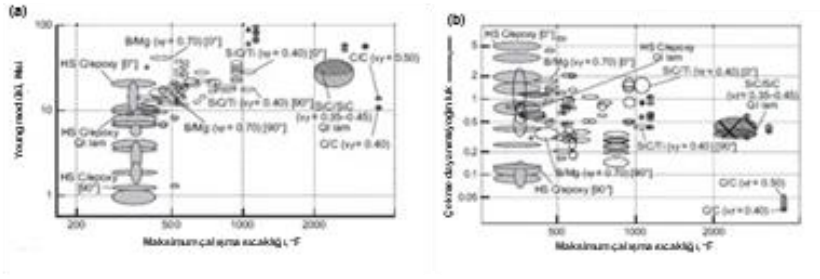
Şekil 3.6 Kompozit sistemler. (a) takviye türleri (b) lamine ve örgü yapıları [23].

3.2.1 Matris Malzeme Türüne Göre Kompozit Malzemeler

Matris elemanının temel ve birincil görevi kompozitin sürekli fazını oluşturmak ve yapıya rijitlik sağlamaktır. Ayrıca matrisin önemli işlevlerinden biri de kompozit malzemenin şeklini vermektir. Matris elemanının ana işlevlerinden biri takviye elemanlarını sarmak ve bir arada tutmaktır. Matrisin sentetik bir yapıdaki bir diğer önemli işlevi de malzeme yüklendiğinde gelen yükü takviye elemanına aktararak olası çatlakların ilerlemesini

yavaşlatmaktır. Ayrıca matris elemanı, takviyeleri kimyasal reaksiyonlardan, aşınmalardan ve çevresel etkenlerden korumaktadır. Bu işlev ve özelliklerin yanında matris, kompozit malzemenin dayanıklılık, süneklik ve darbe dayancı gibi performans özelliklerinde önemli bir etkendir [17]. Matris malzeme türlerine göre kompozitler; üç kategoriye ayrılır: Polimer Matrisli Kompozitler (PMK), Metal Matrisli Kompozitler (MMK) ve Seramik Matrisli Kompozitler (SMK).

PMK'lar, MMK'lar ve SMK'lar arasındaki önemli bir ayrım, maksimum çalışma sıcaklıklarıdır. Şekil 3.7'de gösterildiği gibi, çoğu PMK, 450 ^{o}F'nin altındaki bir çalışma sıcaklığı ile sınırlıdır. Metal matrisli kompozitler, seçilen matrisin kapasitesine bağlı olarak bu aralığı yaklaşık 1200 ^{o}F'ye kadar genişletir ve tipik SMK'lar 2000 ^{o}F'nin üzerinde işlevsel kalabilir [23]. Sıcaklık sınırlamaları, kompozit bileşen malzemelerin sınırlamalarına bağlıdır. Şekil 3.7'deki maksimum çalışma sıcaklıkları yaklaşık 1100 ^{o}F olan SMK'leri temsil eden küçük oval grupları tungsten karbür seramiktir [23].



Şekil 3.7 Çeşitli PMK'ler, MMK'ler, SMK'ler için ashby diyagramı. (a) young modülüne karşı maksimum çalışma sıcaklığı (b) özgül mukavemet (çekme dayanımı/yoğunluk) karşı maksimum çalışma sıcaklığı [23].

Şekil 3.7'daki dikey eksenler, kompozitin (a) young modülünü ve (b) özgül çekme mukavemetini (çekme dayanımı/yoğunluk) temsil etmektedir. Özelliklerdeki geniş dağılım, özellikle PMK'larda durumun, sürekli takviyeli kompozitlerde mevcut olan anizotropinin göstergesidir. Şekil 3.7'de etiketlenen karbon/epoksi kompozit için, uzunlamasına yönde (sürekli karbon fiberler boyunca, 0°) young modülü ile enine yönde (lif yönüne dik, 90°) arasında 20 faktörü vardır. Spesifik güç için karşılık gelen faktör 40'a yakındır [23].

3.2.2 Takviye Geometrisine Göre Kompozit Malzemeler

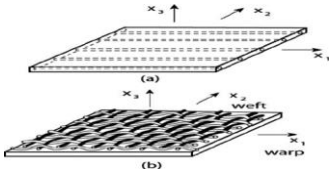
Takviye geometrisine göre kompozit malzemeler üç ana gruba ayrılsalar da, fiber takviyeli ve partikül takviyeli kompozit malzemeler olmak üzere iki ana başlık altında incelenebilir.

3.2.2.1 Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler

Fiber takviyeli kompozit malzemelerde kullanılan takviye elemanına "fiber malzeme" denir. Kompozit bir yapıda takviye görevi gören lifler, sürekli, uzun/kısa, rastgele gibi çeşitli konfigürasyonlarda bulunabilir. Ek olarak, bu farklı ayarlardaki dağılımın yanı sıra liflerin yoğunluğu ve tipi de nihai kompozit malzemenin özelliklerini doğrudan etkilemektedir [24], [25].

Süreksiz fiber kompozitler hizalamada rastgeledir. Bu durum sonucunda mukavemetlerinde ve modüllerinde azalma gözlenmektedir [26].

Sürekli fiber, tek yönlü olarak yönlendirildiklerinde en yüksek mukavemeti sergiler, ancak sürekli fiber takviyeli kompozit malzemede, fiber yönüne dik yönde düşük mukavemet göstermektedir [27]. Şekil 3.8'de gösterilen sürekli fiber takviyeler temel olarak iki gruba ayrılır. Bunlar tek yönlü kumaşlar ve dokuma kumaşlardır.



Şekil 3.8 Sürekli fiber takviye a) tek yönlü, b) dokuma kumaş [28].

Dokuma kumaşlar, 0° ve 90° liflerin düzenli bir desen veya dokuma halinde örülmesiyle yapılır. Kumaşın bütünlüğü, fiberlerin mekanik olarak birbirinin üzerinden ve altından geçmesiyle korunur. Tek yönlü bir kumaş, elyafların çoğunun yalnızca bir yönde ilerlediği bir kumaştır.

Özellikle polimer matrisli kompozitler, genellikle bir laminat oluşturmak için ince tabakaların bir araya getirilmesi ile üretilmektedir. Şekil 3.9' da bu durum gözlenmektedir. Her katman, bir lamina veya kat olarak adlandırılır. Her katın takviye yönünü yönlendirerek, elde edilen laminatın özellikleri ve davranışı kontrol edilebilmektedir.

İnce kesitli fiberler çok yüksek mukavemete sahip olabilir ve matrise mekanik olarak iyi bir şekilde bağlanmaları şartıyla, kompozitin genel özelliklerini büyük ölçüde iyileştirebilirler. Fiber takviyeli kompozitler, cam fiber, karbon fiber ve aramid fiber olmak üzere üç ana tipte incelenmektedir.

3.2.2.2 Partikül Takviyeli Kompozit Malzemeler

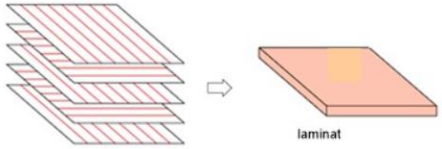
Partikül takviyeli kompozit malzemeler farklı ebatlardaki partiküllerin, bir matris malzemeye rastgele dağılmasıyla oluşturulur. Partiküllerin rastgele dağılımı nedeniyle, bu kompozit malzemeler homojen olarak kabul edilir [29].

3.2.3 Makro Görünümüne Göre Kompozit Malzemeler

Makro açıdan bakıldığında kompozitler, çok katmanlı (tabakalı) kompozitler ve sandviç kompozitler olmak üzere iki başlık altında ele alınmaktadır. Fiber takviyeli bir kompozit, farklı fiber oryantasyonlarına sahip birden çok katmana sahipse buna "çok tabakalı kompozit" denir. Yapısal kompozisyon homojen yapılardan oluşur ve özellikleri sadece içinde yer alan yapısal parçaların özelliklerine değil aynı zamanda geometrik yapılarına da bağlıdır [25], [30].

3.2.3.1 Tabakalı Kompozitler

Tabakalı kompozitler üst üste yığılmış ve birbirine bağlanmış fiber-takviyeli katlardan oluşur. Yapısal bir tabakalı kompozit spesifik bir yığma veya kat düzenlemeye sahiptir. Bu yapının oluşturulması Şekil 3.9’da verilmiştir. Düzlem içi sertlik dengeli durum sağlanmıştır. Teorik olarak bir panelin eğilme rijitliği kalınlığının küpüyle orantılıdır.

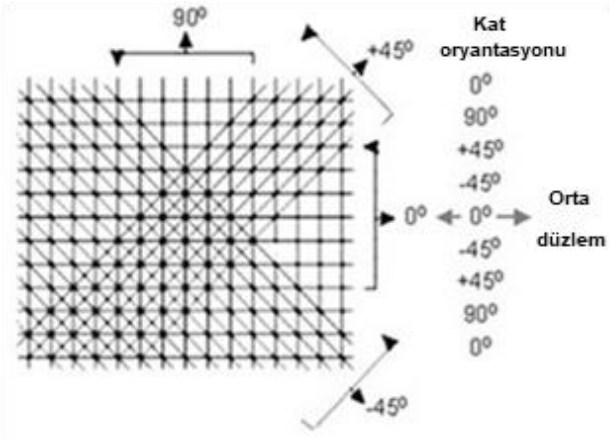


Şekil 3.9 Bir tabakalı kompozitin yapısal dizilişi [31].

Tabakalı kompozit, yüksek mukavemet elde etmek için iki boyutlu tabakaların veya panellerin birleştirilmesiyle oluşturulur. Tabakalar, her ana kuvvetin yönü diğer yönden

farklı olacak şekilde yerleştirilir, preslenir veya yapıştırılır. Tabaka yığma ise, tabakalı bir kompozitin yığma tabakalarındaki fiberlerin koordinat sistemine göre fiberlerin yönelimini belirler. Tabakalı kompozite ait fiberlerin kat oryantasyon gösterimi Şekil 3.10'da gösterilmiştir.

İzotropik, malzemenin özelliklerinin ölçüm yönünde değişmediği, ancak tüm yönlerde aynı olduğu anlamına gelir. Yarı izotropik, düzlem içi izotropik özelliklere sahip olmalıdır. Yarı izotropik bir malzemede, lifler tüm yönlerde rastgele yönlendirilir; Bu tür kumaşlardan oluşturulan katmanlı bir bileşikte, katmanlar 0^0, 90^0, $+45^0$, -45^0 şeklinde düzenlenir. Yönlendirilmiş tek yönlü katmanlarla 0^0, 60^0, 120^0 izotropik yapılar da yapılabilir [31].



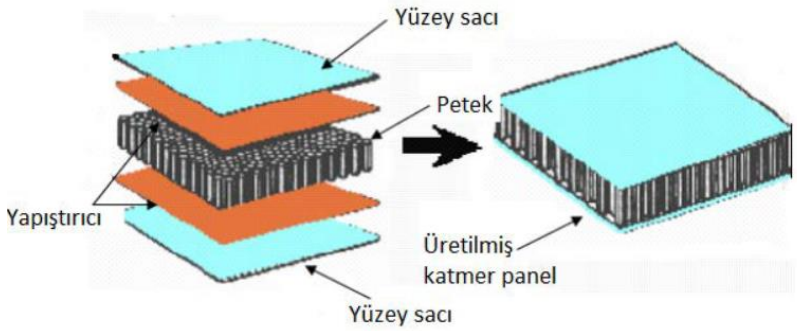
Şekil 3.10 Yarı-izotropik tabakalı kompozitin kat oryantasyon gösterimi [31].

Tabakalı yapılar simetrik, anti-simetrik ve sarmal istiflenen tabakalı yapılar olarak sınıflandırılabilir. Simetrik tabakalı yapılar kendi içinde çeşitli gruplara ayrılır. Örneğin; orta düzlem simetrik tabakalı yapılar, dengelenmiş tabakalı yapılar, açılı tabakalı yapılar, çapraz tabaka yapılar ve yarı-izotropik tabakalı yapılar gibi.

3.2.3.2 Sandviç Yapılı Kompozitler

Sandviç yapılı kompozitler temel olarak yüksek mukavemetli iki ince yüzey malzemesi ve yüzey malzemelerinden nispeten daha kalın, düşük yoğunluklu bir çekirdek yapıdan elde edilen yapılardır. Sandviç yapılı kompozitlerde, yüzey tabakaları bir çekirdek malzeme ile ayrılmaktadır. Düşük yoğunluklu bir çekirdek malzeme kalınlaştırılarak sandviç yapılı kompozitin sertliği artırılır. Eğme hareketi uygulanan bir sandviç yapılı

kompozitte üst tabaka basma kuvveti, alt tabaka çekme kuvveti çekirdek malzeme kısmı ise kayma kuvveti etkisi altındadır. Bu nedenle yüzey malzemeleri, çekme ve basma gerilmelerine dirençli olacak şekilde tasarlanır. Genellikle alüminyum ve fiber takviyeli polimerlerden oluşurlar. Şekil 3.11'de alüminyum petek ile üretilen sandviç yapının bileşenleri gösterilmiştir. Çekirdek yapı, basma ve kayma gerilmelerine dirençli olacak şekilde tasarlanır ve genellikle ahşap, köpük, metal ve polimer malzemelerden oluşur [32], [33].



Şekil 3.11 Alüminyum alaşımından üretilmiş sandviç yapı [31].

Yapısal sandviçlerde, alt ve üst yüzey tabakaları çoğunlukla aynı malzeme ve kalınlıkta tasarlanmaktadır. Bu nedenle yapılar düzlem içi yüklere neredeyse eşit eğilme dayanımı gösterir. Bu tip yapılara simetrik sandviç yapılar denir. Bununla birlikte, bazı özel durumlarda, farklı yükleme koşulları veya çalışma ortamı nedeniyle ön yüzeylerin kalınlığı veya malzemesi değişebilir. Bu konfigürasyon asimetrik sandviç yapılar olarak adlandırılır. Genelde sandviç yapılar simetriktir; sandviç yapıların çeşitliliği temel olarak çekirdeğin konfigürasyonuna bağlıdır. Yapısal olarak, çekirdeğin (çekirdek malzemesi) iki önemli işlevi vardır. İlk olarak üst ve alt tabakaları ayırır ve tabakalara dik yönde etki eden deformasyonlara karşı koyar. İkinci olarak, tabakalara dik düzlemlerde bileşiğe kayma gerilimi ve rijitlik sağlamaktadır. Yüzey katmanlarının ve çekirdeğin yapışması, yük aktarımı ve katmanlı yapının bir bütün olarak işlevselliği için bir diğer önemli kriterdir.

Çekirdek malzeme olarak kullanılabilen çeşitli malzemeler vardır. Üst ve alt katmanlar arasında kullanılan çekirdek malzemeleri, alüminyum alaşımları, elyaf takviyeli plastikler, titanyum, çelik, köpük polimerler, sentetik kauçuklar, inorganik dolgu

maddeleri, balsa, kontrplak ve bir diğer popüler çekirdek malzemesi petektir. Bu hücresel yapılar, aramid bazlı veya alüminyum gibi farklı malzemelerden oluşabilir [31].

Sandviç malzemeler çok dikkatli tasarlanmalı ve üretilmeli, özellikle tasarım aşamasında öncelikle yüzey güçlendirme özelliklerinin arttırılmasına dikkat edilmelidir. Hazırlama işlemi aşamasında tabaka yapısının yüzeyinde gözle görülür bir değişiklik olmamasına rağmen, çekirdek kısımda önemli darbe hasarı veya darbe bozulması meydana gelebilir. Bu tür durumlar genellikle basma veya kesme yükleri altında meydana gelir. Bu çökme mekanizması, darbe kayıt testleri ile tespit edilebilir [31].

3.3 Kompozit Malzemelerin Havacılık Endüstrisinde Kullanım Alanları

Kompozit malzemeler geniş fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerinden dolayı havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek mukavemet/ağırlık oranı bu sektörde kompozit malzemelerin kullanımının artmasının en önemli nedenidir. Uçak ağırlığı azaltılarak daha fazla ağırlık, yakıt ve yolcu taşınabilir. Ayrıca uçakların ağırlıkları yakıt tüketimini doğrudan etkilediği için kompozit malzeme kullanımı yakıt tasarrufu sağlamakta ve aracın servis süresini kısaltmaktadır [10].

Şu anda uçaklarda çok çeşitli kompozit bileşenler kullanılmaktadır. Birincil yapı bileşenleri (bütünlüğü için hayati önem taşıyan uçak) olarak; kanat yapısalları, kuyruk yapısalları ve gövde. Kontrol bileşenleri olarak; aileronlar, yön ve yükseklik için kontrol bileşenleri, yüksek kaldırma cihazları, hava freni, rüzgarlık söylenebilir. Dış bileşenleri olarak; kaplamalar, depo kapıları, iniş takımı tuzak kapıları, radomlar ve ön kanatlar söylenebilir. İç bileşenleri olarak ise; katlar, bölmeler, kapılar, vb. söylenebilmektedir.

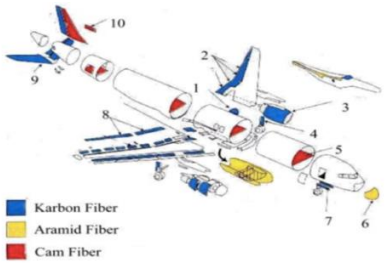
Havacılık endüstrisi için kompozit malzemelerin avantajları;

- Kompozitler metal parçalar kadar güçlü ve onlardan daha hafiftir.
- Kompozit malzemeler aerodinamik profil şekillerini kolaylıkla alabilir.
- Kompozit malzeme kullanımı ile yapıyı oluşturan parça ve bağlantı elemanlarının sayısı azalır. Böylece yapı basitleştirilir ve maliyet düşürülür.
- Kompozitler oldukça esnek ve titreşime dayanıklı bir yapıya sahip olduklarından metal yapılarda yorulma olmayacak şekilde tasarlanabilirler.

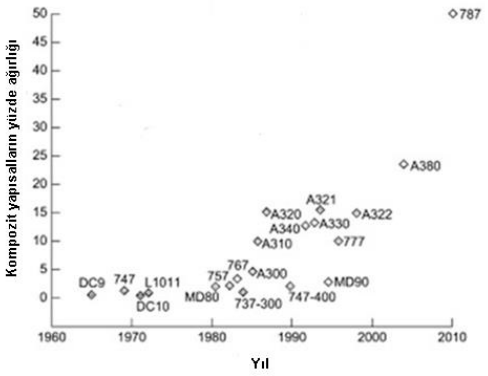
- Metaller gibi paslanma yapmaz. Atmosferik ortama karşı bozunma direnci yüksektir.
- Yüksek yüzey direncine sahiptirler.
- Kompozitler metallerde görülen gerilme çatlaklarını oluşturmadan kolayca esneyebilirler.
- Kompozit malzemelerin üretime uygunluğu, hafifliği, düşük bakım maliyeti ve iyi mekanik özellikleri uçak tasarımında büyük avantaj sağlamaktadır [10].

3.3.1 Havacılık Endüstrisinde Kompozit Uygulamaları

Uçak endüstrisinde kompozit malzemelerin kullanımı 1970'lerden sonra artmıştır. Ağırlığı en aza indirmek, yakıt, montaj ve bakım maliyetlerinde azalmaya neden olmaktadır. Aşağıdaki Şekil 3.12'de, bir uçakta yaygın olarak kullanılan kompozitlerin fiberlere göre genel dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 3.12 Uçaktaki kompozitlerin genel dağılımı, 1- kapılar, 2- kanatçık, 3- motor, 4- iniş takımı, 5- zemin panelleri, 6- burun, 7- merdiven, 8- dahili hava frenleri, 9- yatay kuyruk, 10- dikey kuyruk [34].



Şekil 3.13 Hava araçlarında ağırlıkça kullanılan kompozit malzemelerin yıllara göre dağılımı [35].

Şekil 3.13'de hava araçlarında ağırlıkça kullanılan kompozit malzemelerin yıllara göre dağılımı belirtilmiştir [35].

Epoksi matrisli kompozitler, uçak endüstrisinde kullanılan en yaygın kompozitlerdir. Epoksi matrisli kompozitlerin sivil ve askeri uçaklarda kullanımı Tablo 3.2'de gösterilmektedir.

Tablo 3.2 Hava aracında epoksi matrisli kompozitlerin kullanımı [5].

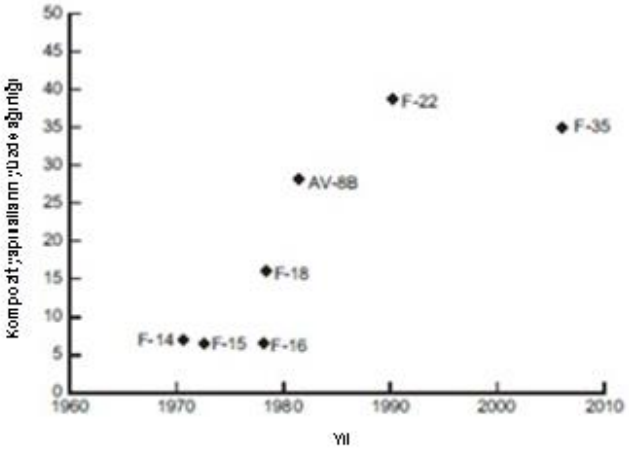
Hava aracı	Kompozit (takviye/matris)
F-14	Boron/epoksi
F-15	Boron/epoksi ve grafit/epoksi
F-16	Grafit/epoksi
F/A-18	Grafit/epoksi
AV-8B	Grafit/epoksi
Boeing 757 & 767	Grafit/epoksi ve Argon- Grafit/epoksi
LearAvia Lear Fan 2100	Grafit/epoksi

F-14 uçaklarında titanyum yerine bor takviyeli epoksi matrisli kompozitlerin kullanılması uçağın kütlesini %20 oranında azaltıyor. Bu da neredeyse 80 kg'a tekabül eden bir rakam olmaktadır. F-15 uçakları için aynı bor takviyeli epoksi matrisli kompozit uygulaması kütleyi %22 oranında azaltır [5].

F-16 uçaklarında yatay ve dikey stabilizatör ve kanatlarda grafit takviyeli epoksi matrisli kompozitler kullanılmaktadır. F-16 uçaklarının %3'ü kompozit malzemelerden yapılmıştır. F/A-18 uçağının kanat yüzeylerinde grafit takviyeli epoksi matrisli kompozitlerde kullanılmaktadır [5].

AV-8B harrier uçaklarının %26'sı grafit takviyeli epoksi matrisli kompozitlerden yapılmıştır. Tüm kanatlar kompozit malzemeden yapılmıştır. Ayrıca yatay stabilizatör ve

ön gövde grafit takviyeli epoksi matrisli kompozitlerden yapılmıştır. Şekil 3.14'de bu askeri hava araçlarının kompozit kullanımındaki ağırlıkça yüzdelik dağılımları yıla göre verilmiştir [5].



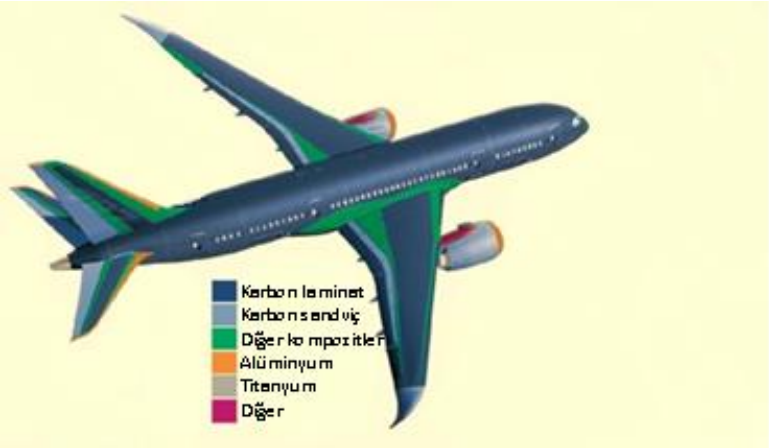
Şekil 3.14 Askeri hava araçlarında kompozit kullanımı [35].

Kompozitler Boeing 757'de yaygın olarak kullanılmaktadır. Kontrol yüzeylerinde grafit takviyeli epoksi matrisli kompozit kullanılmaktadır. Gövde ve kanat kaplamalarında grafit/Kevlar hibrit takviye malzemeleri kullanılmıştır. Boeing 757'de kompozitlerin kullanımı toplam kütlenin 453 kg'a kadar azaltılmasını sağlamıştır. Boeing 767 uçaklarında kompozit malzeme kullanımı kütleyi %20'nin üzerinde azaltmaktadır. Boeing 767'de Kevlar/grafit ve grafit-epoksi kompozitler kullanılmaktadır [35]. Tablo 3.3'de Boeing 787 ve 777 hava araçlarının kullanılan malzemelere göre yüzde oranları verilmiştir. Hava aracındaki kullanılan bölgeleri ise Şekil 3.15'da gösterilmiştir.

Tablo 3.3 Boeing 787 ve 777 hava araçlarının malzeme tipleri ve kullanım oranları [36].

Hava Aracı	Kompozit	Al alaşımları	Ti alaşımları	Çelik	Diğer
Boeing 787	50	20	15	10	5
Boeing 777	11	70	7	11	1

Nomex ve Kevlar bazlı kompozitler, airbus uçaklarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Airbus uçaklarının kanatları karbon fiberden yapılmıştır. Airbus uçaklarının bazı modellerinde ayrıca radomlarda kompozit malzemeden yapılmıştır.



Şekil 3.15 Boeing 787 Dreamliner'da kullanılan çeşitli tiplerde malzemelerin konumları [36].

Helikopterlerde rotor palleri kompozitlerden yapılmıştır. Helikopter rotorlarında kompozitlerin kullanılması aerodinamiğin geometrisini iyileştirir, yüksek mukavemet verir ve maliyeti düşürür. Sikorsky S-76 helikopterlerinde, gövdenin %60'ı kompozit malzemelerden yapılmıştır. Sikorsky S-76 helikopterlerinde yaygın olarak kullanılan kompozitlerin takviye ve çekirdek malzemeleri Kevlar ve Kevlar peteklerdir. Bu durumda kompozit yapının kütlesini azaltır ve titreşimlerin emilimini sağlar.

3.4 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

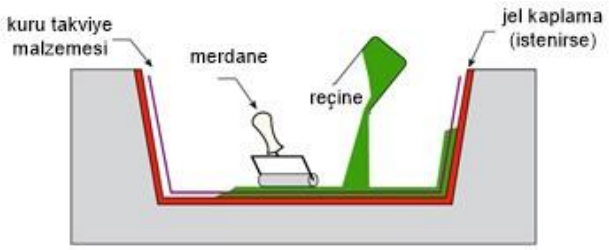
Kompozit malzemelerin üretimi için çeşitli yöntemler vardır. Üretim yönteminin seçimi, matris ve takviye malzemeleri, malzemenin şekli, üretilecek adedi, üretim için gereken süre ve kullanım alanı gibi etkenlere bağlıdır.

Üretim reçeteleri, imal edilecek malzemeye bağlı olarak gerekli tüm parametreleri karşılayabilen bileşiklerin birleştirilmesiyle yapılır. Bunlar matrisler, takviyeler, çekirdekler, yapıştırıcılar ve çözücülerdir.

Üretim yöntemlerini inceleyecek olursak 2 malzeme grubunda inceleyebiliriz. Termoset kompozitlerin işlemesi, nihai ürünün kalitesini etkiler. El yatırma tekniği, püskürtme, otoklav, sıkıştırma kalıplama, filament sarma ve enjeksiyon kalıplama dahil olmak üzere termoset kompozit malzemeleri üretmek için çeşitli teknikler vardır Termoplastik kompozitlerin üretiminde ise enjeksiyon kalıplama, ısıyla şekillendirme, bant sarma, otoklav, diyafram şekillendirme, sıkıştırma kalıplama gibi çeşitli teknikler mevcuttur. Aşağıdaki bölümlerde bu üretim yöntemlerinden en yaygın kullanılanları incelenecektir.

3.4.1 Islak Serim El Yatırma Prosesi

Islak serim el yatırma prosesi kompozit üretiminde kullanılan en eski basit ve kolay bir prosestir. Oda sıcaklığında kürlenebilen reçineler kullanıldığında kullanılan aletler ucuzdur. Matris fiber oranlarına bakıldığında Fiber oranı yüksek ürünler elde edilir. Islak serim yöntemi emek gerektiren yoğun bir süreçtir ve ürünün kalitesi kullanıcının deneyim ve becerilerine bağlıdır. Şekil 3.16'da bu yöntemin örnek görseli verilmiştir. Reçine ve elyaf (veya kesilmiş prepregler) kalıba elle yerleştirilerek ortamdan hava uzaklaştırılır. Kürleme işlemi genellikle oda sıcaklığında gerçekleşir, ısıtma ile kür süreci hızlandırılabilir. Islak serim el atırması işlemi, bazı teknik parçaların çeşitli boyutlarda ve küçük yüzeylerde üretilmesi için kullanılan bir yöntemdir. Uygulamalar, uçak gövdelerini, standart rüzgar türbini kollarını, tekneleri, araçları, tankları, yüzme havuzlarını ve kanalları içerir. Uygulamada kullanılan malzemeler türü ne olursa olsun herhangi bir reçine (örneğin epoksiler, poliesterler, vinilesterler, fenoller vb.) olabilir. Herhangi bir fiber ve çekirdekte kullanılabilir [36].



Şekil 3.16 El yatırması yöntemi [36].

3.4.2 Otomatik Bant (Şerit) Yatırma /Otomatik Fiber Yerleştirme (ATL/AFP) Prosesi

Otomatik bant/fiber yerleştirme, kompozit malzeme elemanlarının bir makine kullanılarak bir yüzeye yerleştirildiği bir işlemdir. Halihazırda farklı fiber besleme teknolojileri kullanılmaktadır.

ATL/AFP makineleri tarafından bandın yerleştirilmesi, yüksek mekanik dayanım için beklenen yüklerle hizalanmış belirli değişen karbon elyaf yönelimlerine sahip katmanlar oluşturmak üzere bilgisayar tarafından hassas bir şekilde kontrol edilir. ATL makineleri nispeten geniş bant (tipik olarak 3 inç ile 12 inç) döşer. AFP makineleri, ATL'ye kıyasla

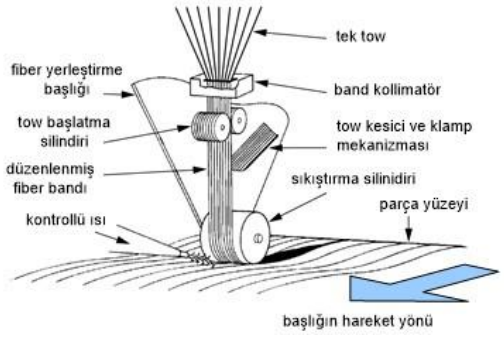
daha yüksek kavisli ve karmaşık parça geometrilerinin üretilmesini sağlayan, birkaç ayrı ayrı sürülen dar banttan (tipik olarak 1/8 inç ile 1/2 inç genişlik) oluşan bir bant yerleştirir. Kompozit bantlar tipik olarak, termoset veya termoplastik reçine ile önceden nüfuz edilmiş (önceden emdirilmiş) fiber takviyesinden oluşur.

Otomatik bant yatırma (ATL): Bu ekipman, çok katmanlı kompozit yapıları imal etmek için düz veya orta derecede eğimli yüzeylere kompozit bant yerleştirir. ATL makineleri tarafından bandın yerleştirilmesi, yüksek mekanik dayanım için beklenen yüklerle hizalanmış belirli değişen karbon elyaf yönelimlerine sahip katmanlar oluşturmak üzere bilgisayar tarafından hassas bir şekilde kontrol edilir.

Otomatik fiber yerleştirme (AFP): Bu ekipman, çok katmanlı kompozit yapıları imal etmek için kavisli veya karmaşık yüzeylere kompozit bant yerleştirir. AFP makineleri tarafından bandın yerleştirilmesi, yüksek mekanik dayanım için beklenen yüklerle hizalanmış belirli değişen karbon elyaf yönelimlerine sahip katmanlar oluşturmak üzere bilgisayar tarafından hassas bir şekilde kontrol edilir.

Makinenin girişi bir rulo ön banttan yapılmıştır. Yayıcı silindirik kafa, malzemenin serildiği yüzey üzerinde tam olarak doğru yerde ve doğru yönde hareket eder ve kendini bilgisayar desteği ile konumlandırır. İstenilen boy ve genişlikte bir bant veya fiber yüzeye, otomatik olarak serimi yapar ve programa girilen parça üretim sınır hattından keser. Bu kesim işleminden sonra kafa hemen başka bir pozisyona geçer ve aynı işlem arka arkaya tekrarlanır. Üretim yöntemi Şekil 3.17'de gösterilmiştir.

Malzemeye istenilen kalınlık ve kuvvet kazandırılırken ağırlığın minimumda tutulması önemlidir. Tipik uygulama alanları uçağın kanat kabukları ve uçak gövdesidir.

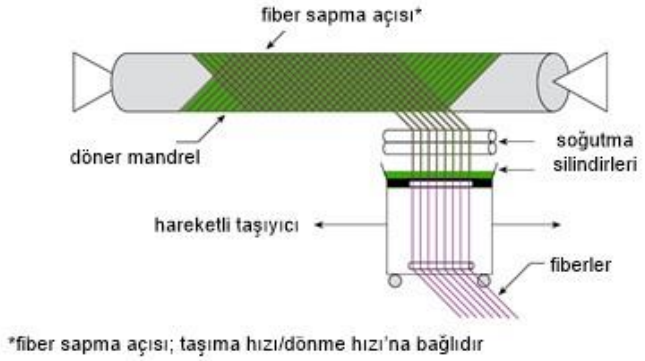


Şekil 3.17 Otomatik dar teyp yerleştirme tekniği

3.4.3 Filament Sarma Prosesi

Gerekli mekanik özellikleri elde etmek için reçine emdirilmiş filamentlerin dönen bir silindirik mandrel üzerine çeşitli açılarda sarılmasıyla üretilir. Ortaya çıkan yapı bir kürleme işlemine tabi tutulur. Proses devam ederken kürlenen parça mandrelden çıkartılır. Filamentler (veya bant, dar bir şerit olabilir) ya bir polimer ile önceden kaplanır ya da bir polimer banyosunun ekstrüde edilmesiyle bir termoset reçine emdirilir. Polimer banyosundan mandrelin yüzeyine sürekli olarak sarılır. Bu sarma hareketi genellikle otomatik olarak yapılır. Kürleme, sarım prosesi parça tasarımına göre yeterli seviyeye geldiğinde fırında veya oda sıcaklığında gerçekleşir. Filament sarma prosesi Şekil 3.18'de gösterilmiştir.

Epoksiler, polyester, vinil ester ve fenoller gibi farklı malzemeler ve farklı fiberler malzeme olarak kullanılabilir. Çekirdek malzeme herhangi bir çekirdek malzeme grubu olabilir [36].



Şekil 3.18 Filament sarma prosesi [36].

İstenen mekanik özellikleri vermek için çeşitli sarım modelleri (yani çevresel, sarmal ve kutupsal) mümkündür. Filament sargılı parçalar çok yüksek güç/ağırlık oranlarına sahiptir.

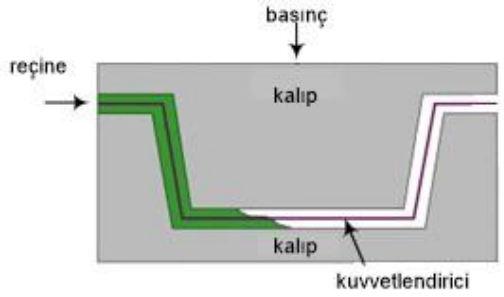
Bu teknik ile sarım tekdüzeliği ve yönü üzerinde yüksek derecede kontrol sağlanır. Çok hızlı ve maliyeti düşük bir üretim yönetemidir. Her fiber üzerindeki reçine miktarı kontrol altında tutulabilir.

Filament sarma prosesi kompleks formlu parçalar için uygun değildir. Reçine viskozitesinin düşük olması gerekmektedir. Malzemenin dış yüzeyinde kalıplama işlemi yapılmamaktadır. Uygulama alanları yaygın filament sargılı yapılar, roket motoru mahfazalarını, depolama tanklarını ve borularını ve basınçlı kapları içerir.

3.4.4 Reçine Transfer Kalıplama (RTM)

Reçine transfer kalıplama yöntemi, kapalı bir kalıplama yöntemidir. Takviye malzemesi doğrudan veya bazen preform olarak hazırlanıp ve kalıba yerleştirilir. Üst kalıp alt kalıbın üzerine kapatılır ve arasına reçine enjekte edilerek kalıp ısıtılır. Kürlenme işlemine tabi tutulur. Tüm işlemler ortam sıcaklığında ve basıncında gerçekleştirilir. Şekil 3.19'da reçine transfer kalıplama methoduna ait görsel verilmiştir.

Kalıp, reçinenin fiberlere daha iyi nüfuz etmesini sağlamak için vakum uygulanabilir. Bu durumda işleme vakumlu reçine enjeksiyon işlemi denir.



Şekil 3.19 Reçine transfer kalıplama yöntemi [36].

Epoksiler, poliesterler ve fenoller genellikle reçine olarak kullanılır; bismaleimid gibi reçineler de yüksek işlem sıcaklıklarında kullanılabilir. Reçineler herhangi bir tipte olabilir. Petek çekirdek malzemeleri uygun değildir. Çünkü hücreler reçine ile doldurulabilmektedir. Aynı zamanda basınç köpüğün bir kısmını kırar veya formunu bozabilir. Bu nedenle sandviç yapılı kompozitlerde çok fazla tercih edilen bir üretim yöntemi değildir.

Reçinesinin transfer kalıplaması ile yüksek fiber hacmine sahip ve çok küçük gözenekli tabaka yapısı elde edilebilir. İşlemde her iki tarafta kalıplanmış (temiz) bir yüzeye sahiptir. Ancak eşleşmeli gereçler pahalıdır ve basınca dayanıklı olması nedeniyle ağırdır. Genellikle küçük parçalara uygulanabilir.

3.4.5 Otoklav yöntemi

Otoklavla imalatta, kalıplanmış parçanın inert gazların vakum, ısı ve basıncının uygulanmasıyla kürlendiği açık kalıplama işlemlerinden biridir. Kalıplanmış parça (veya parça), havanın bir vakum pompası tarafından boşaltıldığı plastik bir torbaya yerleştirilir. Kalıplanmış parçadaki hava kalıntılarını ve uçucu ürünleri ortadan kaldırır. Daha sonra

otoklavda ısı ve soy gaz basıncı uygulanarak malzemenin kürlenmesi ve yoğunlaşması sağlanır. Otoklav ile kürleme tutarlı bir proses sağladığı gibi homojen malzemelerin üretilmesini de sağlar. Yöntem nispeten pahalıdır ve yüksek kaliteli havacılık ürünleri üretmek için kullanılır. Bu işlemin, kompozit tabakaları birleştirmeye yardımcı olan basınç, yüksek lif yüküne sahip parçaların üretilebilmesi ve yüksek kaliteli ürünler gibi bazı avantajları vardır. Şekil 3.20'de sanayi tipi otoklav cihazının görseli verilmiştir.



Şekil 3.20 Sanayi tipi otoklav cihazı

3.4.6 Prepreg Teknolojisi

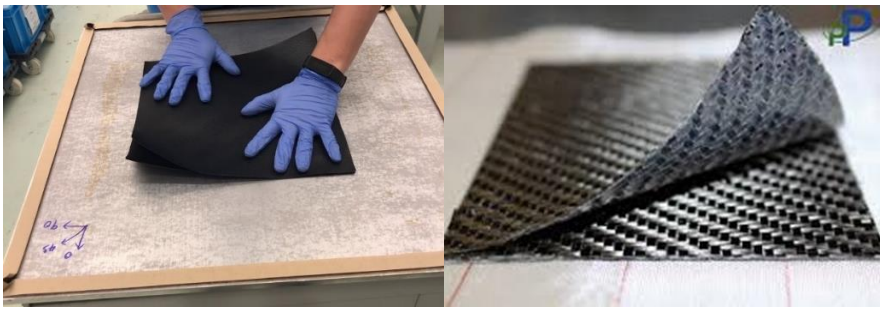
Önceden reçine emdirilmiş tek yönlü veya reçine sistemli dokuma karbon, cam ve aramid elyaflara prepreg denir. Sisteme emdirilen reçine genellikle epoksi esaslıdır. Prepreg maliyetleri yüksek olmasına rağmen ağırlık ve mekanik özelliklerin öncelikli olduğu durumlarda yüksek performanslı uygulamalarda prepregler kullanılmaktadır.

Kompozit prepreg hazırlamanın en yaygın yöntemlerinden biri, bir banyodan bir lif tabakası çekmek veya önceden katalize edilmiş reçine sistemini içeren bir kaptan yerçekimi ile emdirme işlemi yapılır. Bir ısıtma odasında çözücü madde buharlaştırılarak uzaklaştırır ve reçineyi kısmen sertleştirir. İdeal olarak reçine, viskoelastik bir katı üreten kısa polimer zincirleri oluşturmak için çapraz bağlama maddesi ile reaksiyona girmiştir, ancak onu bir camsı katı halinde çapraz bağlamamış veya vitrifiye etmemiştir. Prepreg hafif yapışkan olmalıdır, böylece döşeme sırasında katmanlar birbiri üzerinden kaymaz ve kalıp plakasına şekil verecek seviyede yeterince bükülebilir olmalıdır. Prosesi kontrol etmek son derece önemlidir. Prepregler daha sonra esnek bir arka kağıt ile kaplanır.

Dondurucuda -18°C'de saklama koşulu mevcut olup ısı kürleşmeye neden olduğu için dondurucudan çıkarıldıktan sonra belirli bir sürede kullanım ömrüne sahiptir. Bazı

çeşitler oda koşullarında 4-6 haftaya kadar saklanabilir. Prepreg tabakaların kürlenmesi, spesifikasyonlara göre basınç altında yüksek sıcaklıklarda ısıtılarak elde edilir. Geleneksel prepregler otoklavla kürleme için formüle edilirken, düşük sıcaklıktaki prepregler çok daha düşük sıcaklıklarda tek başına vakum torbası basıncı kullanılarak tamamen kürlenebilir.

Prepreg kumaşlarla üretim, reçine emdirilmemiş elyaflarla üretime göre daha pratiktir ve ürünlerin standart kalitede üretimini sağlamaktadır. Prepreg kumaşlar, üretim sırasında herhangi bir reçine ve sertleştirici kullanımını ortadan kaldırır. Reçine, emdirilmemiş elyafa göre kalıp yüzeyine ve birbirine daha iyi yapışır. Bu nedenle kumaşların serim işlemi daha kolaydır. Ayrıca elle yatırma, vakum infüzyon ve vakumlu torbalama yöntemlerine göre kürlenme süresi daha kısadır. Reçine tedarik işlemi zaten gerçekleştiği için kuru kalma veya fazla reçineyi emme gibi durumlar söz konusu değildir. Bu, üründe herhangi bir mukavemet kaybı olmadan standart ürünlerin elde edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Reçine/elyaf oranı kullanılan prepreg tipine göre %35 ile %50 arasında değişmektedir. Şekil 3.21'de prepreg ile üretime ait görseller verilmiştir.



Şekil 3.21 Prepreg teknolojisi, (a) prepreg serim, (b) tabakalı kompozit serim prosesi esnasındaki görüntüsü

4
POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER

4.1 Giriş

Genel anlamda polimerler mer adı verilen, küçük moleküllerin etkileşimi ile oluşan uzun zincirli, yüksek molekül ağırlıklı bileşiklerdir. Polimerik malzemeler, üretim maliyetlerinin düşük olması ve kalıplanma kolaylığı nedeniyle birçok yerde bulunmaktadır. Yaygın olarak kullanılan polimer malzemelerin örnekleri, PVC (polivinil klorür) ve Teflon'dur (politetrafloroetilen-PTFE) [37], [38].

Kompozit malzemelerin üretiminde matris malzemesi olarak polimer malzemelerin kullanımının tercih edildiği kompozit yapılara polimer matris malzemeleri denir. Polimer matrisli kompozitler, polimerlerin penetrasyon direnci, dayanıklılık ve hafiflik olmak üzere bazı önemli özelliklerinden dolayı zamanla birçok alanda kullanımı artmaktadır.

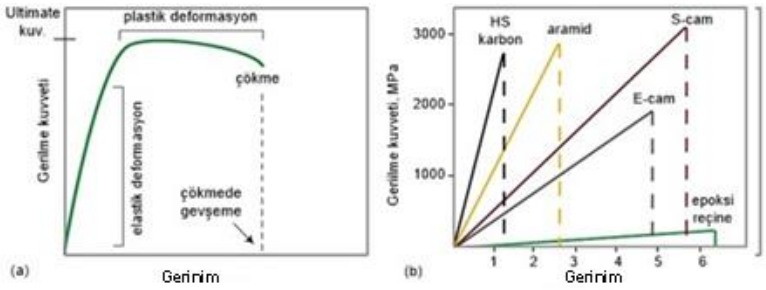
Polimer matrisli kompozitlerin kullanıldığı yapılardaki kullanım amacı; hafif, yüksek sıcaklıklara dayanım gösteren, en az çelik kadar sağlam ve ucuz malzemelerin üretimini sağlamaktır. Bunun için kullanılan malzemelere olan ihtiyacın son zamanlarda artmasıyla beraber polimer matrisli kompozit malzemeleri kullanımı birçok farklı sektöre yayılmaktadır [37].

Polimerlerin, matris malzemesi olarak yapıya katılması; mukavemet ve rijitlikte artış, düşük yoğunluk, kimyasal dayanım, korozyon dayanımı, kolay işlenebilirlik, ve düşük sürtünme katsayısı özelliklerini sunmaktadır.

Bir kompozit malzemede kullanılan bir reçine sisteminin belirli temel özelliklere sahip olması gerekir; İyi mekanik özelliklere, iyi yapışma özelliklerine, iyi dayanıklılığa ve çevresel etkilere karşı yeterli dirence sahip olmalıdır.

Optimum bir reçine sistemi için gerilme/gerinim (uzama) eğrisi Şekil 4.1'de (a) görselinde gösterilmiştir. Eğriye göre sistem yüksek dayanıklılığa ve yüksek gerilime sahiptir. Bu bilgi, reçinenin sert olduğu ancak kırılgan olmadığı anlamına gelir. Reçine ve takviye olarak kullanılan fiber arasında güçlü bir bağ sağlanmalıdır. Bu durumda, optimum bir

arayüzey oluşturulur ve malzemeye etki eden yükün verimli bir şekilde aktarılmasını sağlamaktadır.

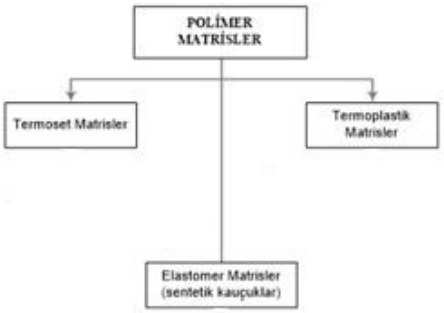


Şekil 4.1 (a) optimum reçine sisteminin, (b) dört adet fiber malzeme türü ve epoksi bazlı reçinenin gerilme/gerinim eğrileri [39].

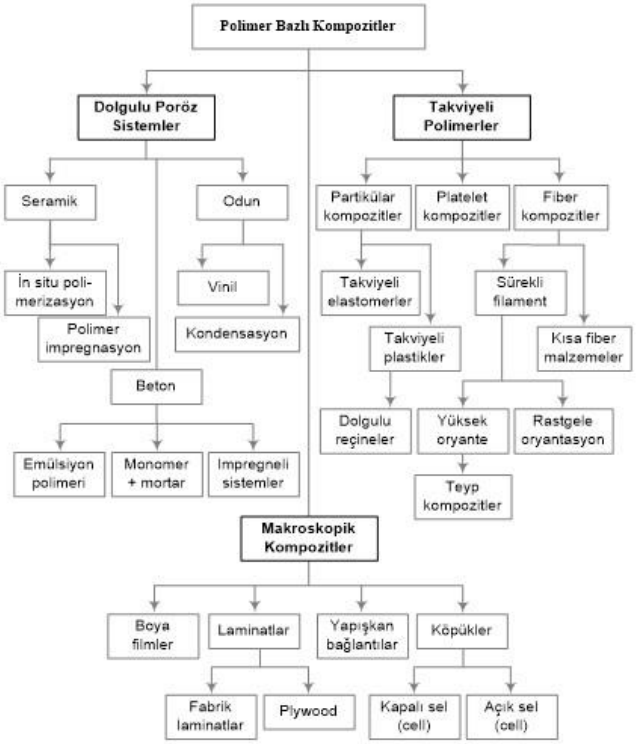
4.2 Polimer Matrisli Kompozitlerin Matris Malzemesine Göre Sınıflandırılması

Polimer matris yapısına sahip kompozitler, termoplastik matrisli ve termoset matrisli olmak üzere ikiye ayrılır. Termoset matrise sahip kompozitlerde yaygın olarak kullanılan matris malzemeleri; Örneğin, epoksi, polyester ve vinil ester. Termoplastik matrisli kompozitlerde ise poliamid, polipropilen ve polietilen bazlı malzemeler yaygın olarak kullanılan malzemelere örnektir [30].

Polimer bazlı matris malzemeleri, fiber preformlara kolayca emilebildiğinden kompozit üretiminde en yaygın kullanılan matrislerdir; termoset matris, elastomer matris ve termoplastik matris yapıları olmak üzere üç ana grupta toplanabilir. Şekil 4.2 ve şekil 4.3'de görülebileceği üzere polimer bazlı kompozilerin ve matris türlerine göre sınıflandırmaları yer almaktadır.



Şekil 4.2 Polimer matrisler [31].



Şekil 4.3 Polimer bazlı kompozitlerin sınıflandırma sistemi [31].

4.2.1 Termoplastik Matrisli Malzemelerin Sınıflandırılması

Termoplastikler, yaygın bir şekilde doğrusal veya hafif dallanmış yapılardan oluşan polimerlerdir. Termoplastik matris malzemeleri, zayıf van der Waals bağları içeren ve uzun moleküler zincirlerle birbirine bağlanan malzemelerdir. İşleme sırasında reaksiyona girmezler. Bu özelliklerinden dolayı reaktif olmayan katı malzemeler olarak da adlandırılabilirler. Bu malzemeler genellikle ısı ile kolayca kalıplanabilen ve soğuduktan sonra ısıtılarak dönüştürülebilen plastiklerdir. Yeniden işlenebilirler. Bu durumda, yeniden şekillenebilirlik özelliği bir defaya mahsus değil tekrarlanabilir bir işlem olarak ortaya çıkmaktadır. Bu durum sayesinde termoplastik matris malzemelerinin en büyük avantajı olan geri dönüştürülebilirliği sağlamaktadır.

Termoplastikler amorf veya yarı kristal formda olabilir; amorf bölgelerle muadil kristal bölgelerin zincir yapıları rastgele dizilimli sarmallar şeklini alırlar. T_g'nin altındaki sıcaklıklarda, tipik olarak termoset malzemelerden daha fazla tokluğa ve sünekliğe sahiptirler. T_g'nin üzerinde, bu iki özellik hızla artarken, mukavemet azalır. Mukavemetteki azalma, amorf zincirlerin camsı halden T_g üzerinde kauçuk faza geçişi gerçekleşmektedir. T_m'nin üzerindeki sıcaklıklarda ise viskozite, faz değişikliği olmadan

kademeli olarak düşer ve termoplastik fiber boşluklardan nüfuz edebilen viskoz bir sıvı haline gelmektedir. Termoplastik malzemelerin en önemli özelliklerinden bazıları aşağıda verilmiştir;

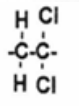
- Yüksek direnç,
- Yüksek ısı direnci,
- İşlenebilirlik kabiliyeti yüksek.

Termoplastik matris malzemeleri çok farklı yapılara sahiptir. Başta mühendislik uygulamaları olmak üzere çeşitli kullanım alanlarında uygulanan belli başlı termoplastik esaslı polimerler ve özellikleri aşağıdaki tablo 4.1'de belirtilmiştir [37], [40], [41].

Tablo 4.1 Bazı örnek termoplastik bazlı polimerler ve özellikleri [41].

Polimerlerin İsmi	**Molekülün Yapısı - Avantajları**	**Kullanım Alanları**	**Özellikler**
Polipropilen (PP)	 -Isıl dayanıklılık -Yüksek elektriksel yalıtkanlık -Yüksek yorulma dayancı	-Radyo ve TV kasaları -Bavul, çanta -Mobilya döşemesi -Ambalaj	$T_ç$=70 °C R_m=34N/mm^2 A=%100 σ_b=45 N/mm^2
Polistiren (PS)	 -Canlı yüzey görünümü -Yüksek termal kararlılık -Yüksek boyutsal kararlılık	-Akü koruma paneli -Beyaz eşya ürünleri -Pimpon	$T_ç$=66-74 °C R_e=42-51N/mm^2 A=%41-79 σ_b=56-89 N/mm^2

Tablo 4.1 Bazı örnek termoplastik bazlı polimerler ve özellikleri [41]. (devamı)

Polivinil klorür (PVC)	 -Düşük maliyet -Isıtılarak şekil vermeye uygun	-Elektrik yalıtım malzemeleri -Döşeme kaplamaları -Pencere profilleri	$T_ç$=70 °C R_m=34N/mm^2 A=%100 σ_b=45 N/mm^2

Termoplastik malzemeleri termosetlere kıyasladığımızda, termosetlere göre daha sert ve tok malzemelerdir. Boyutsal özelliklerinin ve termal kararlılığın termoplastiklere göre daha zayıf olduğunu söylemek mümkündür [25], [30], [37].

4.2.1.1 Poliamid

Poliamidler çok iyi bildiğimiz naylonlardır. Tiplerine göre farklı monomerlerden elde edilirler. Moleküler yapıları çok düzenlidir, bu nedenle yüksek yüklere dayanabilirler. Poliamidler aşınmaya karşı dayanıklıdır. Düşük bir sürtünme katsayısına sahiptirler, bu da kaygan oldukları anlamına gelir. Çekme mukavemeti alüminyum alaşımlarınınkiyle karşılaştırılabilir olduğundan, dişliler ve yataklar gibi mekanik malzemelerin imalatı için uygundur.

4.2.1.2 Polistiren (PS)

Polistirenin genel amaçlı ve kristalli homopolimerlerinin yanı sıra stiren-maleik anhidrit (SMA), stiren-akrilonitril (SAN), stiren-bütadien (SBR) ve stiren-akrilikler gibi çeşitli ko-polimerleri vardır.

4.2.1.3 Polietilen (PE)

Polietilen beyaz renge sahip veya yarı saydam bir termoplastiktir. Etilen polimerizasyonu ile üretilir. Polietilenin mekanik özellikleri, polimer zincirlerinin uzunluğuna ve dallanma derecesine, kristal yapısına ve molekül ağırlığına bağlı olarak değişir. Kısa zincirli yapılar kırılgan ve uzun zincirlere sahip sert plastiklerdir.

4.2.1.4 Polieterimid (PEI)

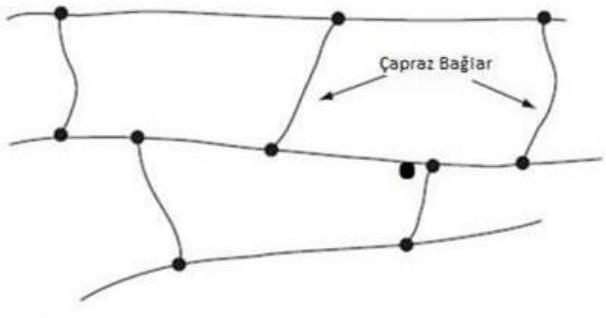
Polieterimid, amorf bir termoplastik polimerdir. Yüksek sıcaklıklarda mukavemeti ve modülü yüksek, kesme mukavemeti düşüktür. Düşük ısıl kararlılık nedeniyle yüksek boyutsal kararlılığa sahiptir. Kimyasallara ve asitlere karşı dayanıklı olmasına karşın bazik ortamlardan etkilenir. Havacılık endüstrisindeki dahili ekipmanlarda, yakıt vanaları için imal edilen fiber takviyeli kompozitlerin matris malzemesi olarak kullanılır. Ayrıca otomotiv, medikal ve diğer bazı sektörlerde kullanılabilen bir polimer türüdür. Aşağıda Tablo 4.2'de termoplastik malzemelerden bazılarının karakteristik özellikleri verilmiştir.

Tablo 4.2 Termoplastik malzemelerden bazılarının karakteristik özellikleri [41].

Termoplastik malzemeler	Camsı geçiş sıcaklığı, (°C)	Erime sıcaklığı, (°C)	Amorf yoğunluk, 250°C, (g/cm^3)	Kristal yoğunluk, 250°C, ($g/cm^{3)}$)	Mol Ağırlığı, (g/mol)
Poliamid66	50	255	1.07	1.24	226.32
Polietilen (PE)	-78	100	0.855	1.00	28.05
Polieterimid (PEI)	216	-	1.27	-	592.61
Polietereterketon (PEEK)	143	343	-	-	288.31

4.2.2 Termoset Matrisli Malzemelerin Sınıflandırılması

Termoset matrise sahip malzemeler, oda sıcaklığında sıvı formda olan, bir veya daha fazla bileşenden oluşan malzemelerdir. Termoset matris yapısına sahip malzemelerde çapraz bağlar, bu tip malzemelere önemli özellikler olan rijitlik, uzun çalışma ömrü ve ısıl direnç kazandırmaktadır. Termoset matris malzemesinin yapısındaki çapraz bağların sayısı arttıkça moleküler hareketler baskılanmaktala beraber bu durum yapıda sertlik ve darbe dayancı vb. özellikler iyileştirilmektedir. Şekil 4.4'de termoset matrise sahip yapılarda bulunan çapraz bağların şematik gösterimi verilmektedir [42], [43].



Şekil 4.4 Termoset matrise sahip yapılarda bulunan çapraz bağların şematik gösterimi [43].

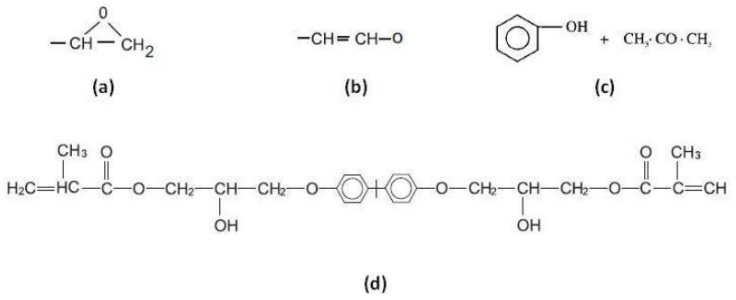
Termoset matrise sahip malzemenin başlıca önemli özellikleri şu şekilde sıralanmaktadır;

- Çapraz bağ yapısı yoğun,
- Yüksek termal kararlılık ve boyutsal tutarlılık,
- Yük etkisindeyken sürünme kabiliyeti ve deformasyona karşı dayanım,
- Yüksek ısı ve elektriksel izolasyon,
- Yeniden geri dönüştürülemez (tekrardan proses edilememe),
- Isıtma sonrası yapıda bozulma.

Termosetlerin viskoziteleri düşüktür. Termoset reçinelerin ana avantajı, sıvı formda olmaları ve bu nedenle elyafı tamamen ıslatabilmeleridir. Elyafların reçine ile tamamen emdirilebilmesi neticesinde yüksek kaliteli bir nihai ürün elde edilir. Fiber preformlar içine kolaylıkla infiltre edilebilirler. Rijitlik ve mukavemet değerleri yüksek olup, kimyasal etkilere karşı dayanıklıdırlar.

Isıyla sertleşen reçinelerin ana dezavantajı, kürlenme işleminin devamında gerektirmeleri ve kürlenme sonrası yeniden formüle edilememeleri veya tekrar kullanılamamalarıdır. Bu gruptaki malzemeleri tekrardan işlemek veya şekillendirmek mümkün değildir. Isıtıldıklarında (bir katalizör varlığında) katılaşırlar ve yeniden eritilemezler. Moleküller kimyasal ve faz değişimlerine uğrar.

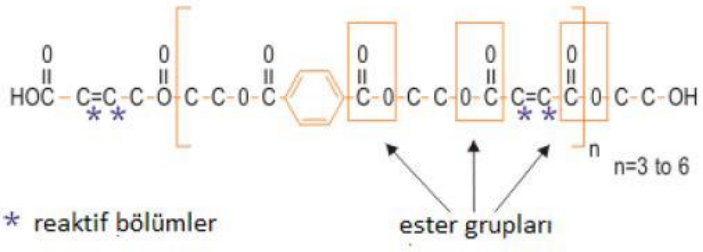
Termoset matris malzemeleri arasında polyester, epoksi ve vinil ester endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak karşılaşılanlardır. En büyük sınırlamaları, kırılganlıkları ve yüksek sıcaklıklardaki davranışlarıdır. Şekil 4.5'de yaygın kullanılan termoset matris malzemelerinin kimyasal formları verilmiştir.



Şekil 4.5 Yaygın kullanılan termoset matris malzemelerine ait kimyasal yapılar: a) Epoksi, b) Doymamış Polyester, c) Fenolik Reçine, d) Vinil ester [42].

4.2.2.1 Polyester

Polyester reçineler, genellikle termoset reçineler arasında bulunan ve ön planda olan bir reçine malzemeleridir. Polyester reçinenin diğer reçinelere göre düşük bir maliyete sahiptir. Diğer termoplastik reçinelere göre mekanik özellikleri orta düzeydedir. İyi işlenme kabiliyetine sahip olması ve çevre koşullarına karşı dirençleri nedeniyle yaygın bir şekilde matris malzemesi olarak kullanılırlar. En önemli dezavantajlarından biri kürlenme sırasında çok fazla çekmesi ve toksik stireni gaz formunda yaymasıdır. Şekil 4.6'de Polyesterin kimyasal yapısına ait şematik gösterimi verilmiştir [39], [42], [43].



Şekil 4.6 Polyester'e ait kimyasal yapının şematik gösterimi [42].

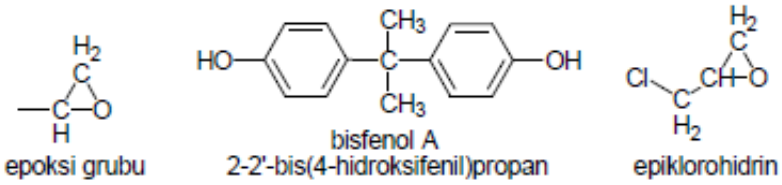
4.2.2.2 Epoksi

Epoksi reçine termoset reçineler arasında en fazla tercih edilen bir reçine malzemesidir. Yapısında bulunan yüksek aşınma dayanımı, görece üstün rijitlik, üretim kolaylığı, iyi ıslatılabilirlik, aleve karşı dayanıklılık, iyi darbe direnci ve kimyasal etkilere karşı iyi dayanımı gibi özellikleri nedeniyle sanayi uygulamalarında yaygın bir kullanıma sahiptir. Ayrıca epoksi reçine farklı yüzeyler için uygun olup ve iyi işlenebilme kabiliyeti de

bulunmaktadır. Bu özellik sayesinde kullanımını ve kullanım alanını öncelikli hale getirmektedir. Epoksinin kimyasal yapısı Şekil 4.7'de verilmektedir [44].

Epoksi reçineler, polyester reçineler gibi kürlenme sırasında hafif bir çekme gösterir. Ancak bu durum polyester reçinelerde olduğu gibi sorun yaratmaz. Çok düşük boyutlarda kaldığından göz ardı edilebilir bir durumdur. Epoksinin maliyeti, polyester ve vinilester reçineden daha yüksektir [44].

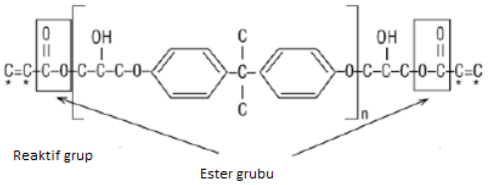
Moleküldeki iki aromatik halka grubu, mekanik ve termal dayanımları doğrusal gruplardan yapı içerisinde daha iyi absorbe ettiğinden, epoksi reçineleri çok iyi sertlik, ısıl dayanım ve elektriksel yalıtım özelliklerine sahiptir. Mekanik özellikleri ve çevresel faktörlere karşı direnci, diğer birçok termoset malzemeden daha iyidir. Bu durumda havacılık gibi sektörlerin uygulama alanlarında epoksileri tercih edilir kılmakta ve önemini arttırmaktadır [39].



Şekil 4.7 Epoksi reçineye ait kimyasal yapının şematik gösterimi [44].

4.2.2.3 Vinil ester

Vinil ester, bisfenol A gibi bir epoksi reçinesinin ve doymamış karboksilik asitlerin reaksiyonuyla meydana gelen, ısıyla sertleşen bir reçinedir. Vinil ester termosettir. Vinil esterin kimyasal yapısına ait şematik gösterimi Şekil 4.8'de yer verilmiştir. Vinil ester reçinelerini önemli kılan temel özellik, zincir yapısında yüksek moleküler ağırlıklı bir epoksi reçinesinin bulunmasıdır. Yapısal epoksi, rijitlik ve esnekliğin yanı sıra mükemmel mekanik özellikler de sunmaktadır [42], [45].



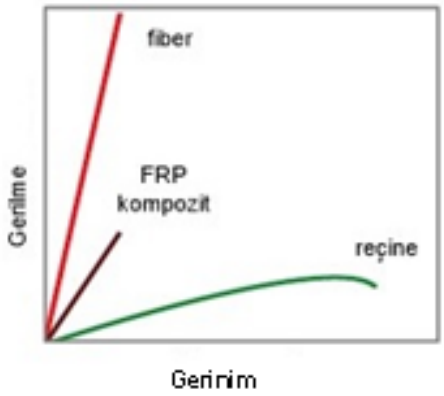
Şekil 4.8 Vinil ester kimyasal yapısına ait şematik gösterimi [39].

4.2.2.4 Elastomer Matrisler

Elastomer matrisler çoğunlukla ısıyla sertleşen polimerlerdir. Yapıları termoset özelliğine sahiptirler. Elastomerler kürlendiğinde, uzun polimer zincirleri arasında çapraz bağlanma oluşmaktadır. Temel özellikleri elastik bir yapıya sahip ve esnektir. Oda sıcaklığında düşük gerilim ile gerildiklerinde boylarının en az iki katı kadar esnerler ve gerilim kaldırıldığında hemen orijinal boyutlarına geri düzelmektedirler.

4.3 Polimer Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özellikleri

Epoksiler ve polyesterler gibi reçinelerde mevcut olmasına rağmen, imalatta kullanım alanları oldukça dardır. Bunun en temel sebebi metallere göre mekanik özellikleri daha zayıf kalmasıdır. Cam, aramid ve boron gibi malzemeler yüksek çekme ve basma dayanımlarına sahiptir. Gerilim uygulandığında yapıda optimum dayanım değerlerinin altında hasarlar gözlenmektedir. Hatta bu hasarlar kırılma şeklinde meydana gelmektedir. Fiber şeklinde alınarak bu sorun çözüme kavuşturulur. Bunun nedeni ise lif demetleri, malzemenin optimum performansını gösterir. Şekil 4.9'da verilen gerilme-gerinim eğrisi incelendiğinde reçine sistemleri takviye edici fiberlerle (cam, karbon, aramid bazlı) birleştirildiğinde mekanik özellikleri iyileştirilmektedir.



Şekil 4.9 Fiber takviyeli polimer matrisli kompozite ait gerilme-gerinim eğrisi [39].

Yüksek mukavemet ve rijitlik, karmaşık şekillerin işlenebilirliği, çevresel koşullara karşı yüksek dayanım, kompozitleri birçok uygulamada metallere kıyasla tercih edilebilir hale getirmektedir. Polimer matrisli kompozitlerin özellikleri, matris ve takviye fazlarına ait malzeme özelliklerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Takviyenin kompozit içindeki yüzdece hacimsel oranı (takviye/reçine), takviyenin geometrik yapısı ve oryantasyonu gibi parametreler kompozitin özellikleri üzerinde en fazla etkiye sahiptir.

Genel olarak, fiberlerin mekanik özellikleri reçineninkinden daha yüksektir. Bu nedenle kompozitteki reçine miktarının azaltılması, belirli bir noktaya kadar kompozitin mekanik özelliklerini iyileştirir.

Fiberlerin geometrisi de kompozitin özelliklerini etkileyen diğer bir değişkendir. Tek yönlü fiberler boyuna en yüksek mekanik özelliklere sahiptirler. Diğer bir taraftan, eni doğrultusunda mekanik özellikleri daha zayıf kalmaktadır. Bu durum neticesinde kompozit yapının mekanik özelllikleri açısından yön olarak bağımlı özellik göstermektedir.

Polimer matrisli kompozitlerin özellikleri, başta olmak üzere büyük oranda sıcaklığa bağımlıdır. Bunun nedeni, birçok polimerin özelliklerinin sıcaklıkla değişmesidir. Tablo 4.3'deki özelliklerden Poisson's oranı, kompozit boyuna yönde yüklendiğinde, enine gerinmenin boyuna gerinmeye oranına eşittir. Görüldüğü gibi enine modül ve kuvvet değerleri, boyuna değerlerden çok daha düşüktür.

Tablo 4.3 Tek yönlü epoksi matrisli kompozite ait mekanik özellikleri

Fiber	Modül, GPa		Poisson oranı	Çekme kuvveti, MPa		Basma kuvveti, MPa	
	Boyuna	Enine		Boyuna	Enine	Boyuna	Enine
Boron	210	19	0.25	1240	70	3310	280
E-Cam	45	12	0.28	1020	40	620	140
Aramid	76	5.5	0.34	1240	30	280	140

Tek yönlü laminatlar düşük enine kesme dayanımlarına sahiptir. Bu durumda sonucunda yapısal uygulamalar için uygun değildir. Levha şeklindeki laminatlar, uygun mukavemet, rijitlik, burulma dayanımı vb. elde etmek için farklı yönlerde istiflenir. Laminat geometrilerinin seçimi geniştir. Yarı izotropik laminatlar, düzlemin tüm yönlerinde aynı elastik özelliklere sahiptir.

Yarı izotropik kompozitlerin mekanik özellikleri tablo 4.4'de verilmiştir. Modül ve yük değerleri, aynı malzemeden yapılan tek yönlü laminatların eksenel özelliklerinden çok daha düşüktür.

Tek yönlü kompozitlerin metallere göre en büyük avantajlarından biri yorulma dayanımlarıdır. Karbon, boron ve aramid fiberlerle güçlendirilmiş polimer matrisli kompozitlerin gerilme/uzama eğrileri oldukça düzdür. Cam takviyeli kompozitlerin mukavemeti artan çevrimlerle azalır.

Tablo 4.4 Bazı yarı izotropik polimer matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri

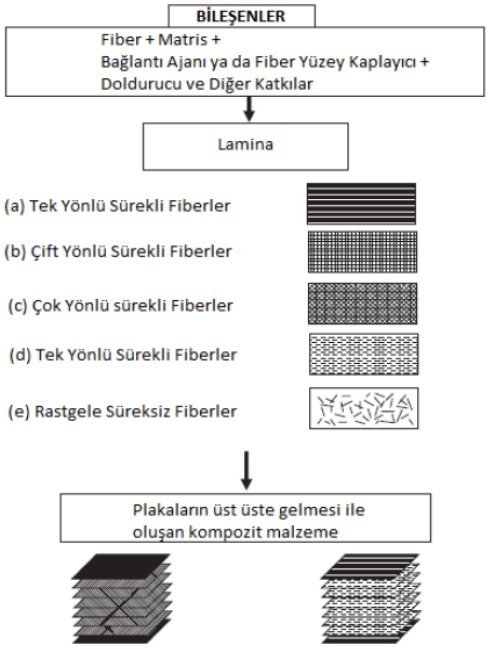
Fiber	Modül, GPa		Poisson oranı	Çekme kuvveti, MPa		Basma kuvveti MPa	
	Boyuna	Enine		Boyuna	Enine	Boyuna	Enine
E-Cam	23	23	0.28	550	550	330	330
Aramid	29	29	0.32	460	460	190	190
Boron	80	80	0.33	480	480	1100	1100

4.4 Polimer Matrisli Kompozitlerde Fiber Malzeme Türüne Göre Sınıflandırılması

Fiberlerin kompozit içerisindeki boyut ölçüleri, dağılım yönleri, yoğunluğu ve diğer özellikleri, kompozit yapının mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Fiber malzemeler, kompozit bir yapıda partikül, sürekli fiber ve süreksiz fiber olmak üzere üç farklı biçimde bulunabilmektedir. Tane formları çoğunlukla küresel olmadığı için yapı içerisinde homojen dağılmaları, mekanik özellikleri açısından dikkat edilmelidir. Süreksiz fiberlerin boyutu birkaç milimetreden birkaç santimetreye kadar değişebilir. Genel olarak, çoğu fiberin çapı birkaç mikrometreyi geçmez. Sürekli fiberler genellikle dokunur ve farklı konfigürasyonlara sahip olmaktadırlar. Şekil 4.10'da kompozit malzemelerin fiber türüne göre şematik ayrımına yer verilmektedir [24], [46], [47].

Kompozit malzemelerde, çoğunlukla takviye malzemesi olarak kullanılan bir fiber türü, cam fiberdir. Cam fiberin, maliyeti ve mekanik özellikleri göz önüne alındığında tercih edilmektedir. Cam fiber yanı sıra, yaygın olarak kullanılan diğer bir fiber malzeme türü de karbon fiberdir. Karbon fiber, çok iyi mekanik dayanıma sahip bir malzemedir. Fakat maliyeti diğer fiber malzeme türlerine göre oldukça yüksektir. Maliyeti yüksek olmasına

rağmen mekanik özelliklerin çok önemli olduğu, havacılık ve uzay endüstrisinde en yaygın kullanılan takviye malzemesidir. Fiber malzemesine göre 3 ana grupta inceleyebiliriz; cam fiber, karbon fiber, aramid fiber.



Şekil 4.10 Fiber (takviye) dokuma tipleri [47].

4.4.1 Cam Fiber-Takviyeli Polimerler (CFTP)

Cam fiberler şu anda en yaygın kullanılan fiber türüdür. Cam fiber üretiminde cam kullanılmaktadır [48]. Cam fiberler, onu oluşturan cam bileşenlerin cinsine ve oranına bağlı olarak farklı isimlerle anılır.

Tablo 4.5'te açıklanan cam elyaf türleri karışımının bileşimi dikkate alındığında, her cam türünde bulunan oksit türü ve miktarı farklıdır. Bu bileşenler ve ilişkileri istenilen özelliklere göre birleştirilir. Tablo 4.6'da ise listelenen belirli cam fiber türlerinin mekanik özelliklerine bakarsak, her bir cam fiber türünün farklı mekanik özellikleri vardır.

Tablo 4.5 Cam fiber türlerinin oksit içerikleri [48].

Yüzdece Oksit (%)	A-Cam	C–Cam	D-Cam	E-Cam	R-Cam	S-Cam
	%	%	%	%	%	%
SiO_2	64-71	65-67	73-74	53-55	57-59	65

Tablo 4.5 Cam fiber türlerinin oksit içerikleri [48]. (devamı)

Al_2O_3	0-6	4	0-1	13-15	24-25	25
B_2O_3	0-6	5	22-23	6-9	0-0,3	<0,05
BaO	-	0-1	-	-	0-0,1	-
CaO	7-9	11-15	0-1	17-24	9-14	0-0,2
MgO	0-3	3	-	0-5	5-6	9,5-10,3
Fe_2O_3	0-0,5	0,8	0-0,3	0-0,4	0-0,5	0-0.1
TiO_2	0-0,6	-	-	0-0,8	0-0,25	-
$Na_2O+ K_2O$	14-16	7-10	0-4	0-2	0-1	<0,3
Fe_2	0-0,4	-	-	0-1	0-0,1	-

Tablo 4.6 Bazı cam fiber türlerine ait mekanik özellikler [49].

Cam-Fiber Tipleri	Çekme Mukavemeti (Mpa)	Çekme Modülü (Gpa)	Yüzdece Kopma Uzaması (%)	Malzeme Yoğunluğu (g/cm^3)
S-Camı	4,020-4,650	83-86	5,3	2,46
Bazalt	3,000-4,840	93-110	3,1-6	2,65-2,8
E-Camı	3,100-3,800	72,5-75,5	4,7	2,50-2,62

Epoksi ve doymamış polyester gibi polimerik reçineler için takviye elyafı olarak yaygın olarak kullanılırlar. Cam fiberin sertliği diğer takviye fiberlerden daha düşüktür, ancak çok yüksek mukavemeti düşük yoğunluklu ve hepsinden önemlisi çok uygun bir maliyetle birleştirmenin belirgin avantajına sahiptir [29].

Cam fiberler, plastik malzemelerin çekme mukavemetini, elastikiyet modülünü, sürünme dayanımını, darbe dayanımını, boyutsal stabilitesini, termal ve kimyasal dayanımını arttırmak amacıyla takviye olarak kullanılmaktadır [50].

4.4.2 Karbon Fiber-Takviyeli Polimerler (KFTP)

Karbon fiberler, havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılan çok dayanıklı malzemelerdir. Karbon fiber takviyeli kompozitler, diğer malzemelerin çoğundan daha iyi yorulma direncine sahiptir. Optimum matris ve takviye uyumu sonucunda yapı korozyona dayanıklı olabilmektedir [39], [51], [52].

Karbon fiber takviyeli polimerlerde kullanılan en popüler matris türlerini termoset ve termoplastik matrisliler olmak üzere ikiye ayrılırlar. Bu matris türlerinden en çok bilinenleri termosetler için epoksiler ve polyesterler olurken termoplastikler için naylonlardır (poliamidler). Karbon fiberlerle güçlendirilmiş polimerik malzemeler, laminat bir yapıya ve iki yönde (boyuna ve enine) takviye etkisine sahiptir.

Karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerin kullanım alanları oldukça geniştir. Bunlar eğlence malzemelerinin yapımında, roket ve motor kasalarında, basınçlı kaplarda, havacılık endüstrisinde, otomotiv endüstrisinde ve inşaat endüstrisinde yaygın olarak kullanılırlar.

4.4.3 Aramid Fiber-Takviyeli Polimerler (AFTP)

Aramid fiberler, polimer matrislerde en yaygın olarak kullanılan fiber türüdür. Epoksiler ve polyesterler aramid fiberler ile birlikte genellikle kullanılan matris tipleridir. Aramid fiberlerin iyi tokluğu olduğu için birçok tekstil işlemi ile işlenebilirler. Aramid kompozitlerin özel uygulama alanları balistik, spor malzemeleri, iplikler, halatlar, mermi kartları, basınçlı kaplar, otomotiv freni ve bağlantı hortumları ve contalarıdır.

Sürekli ve lamine edilmiş cam, karbon ve aramid fiber takviyeli epoksi matrise sahip kompozitlerin özellikleri Tablo 4.7'de verilmektedir. Fiberlerin hacimsel fraksiyonu 0.60'tır.

Tablo 4.7 Fiber takviyeli polimer matrisli kompozitlerin fiber türlerine göre tipik özellikleri

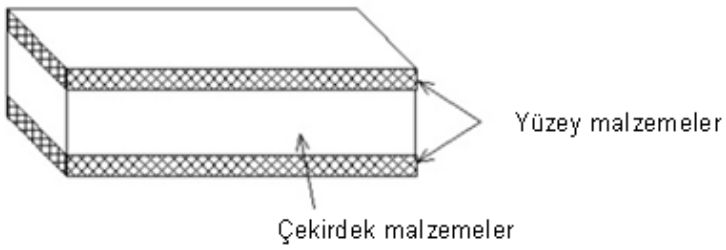
Fiber Türleri	Özgül Ağırlık (g/cm^3)	Gerilme kuvveti, (MPa)		Gerilme modülü, (GPa)	
		Boyuna	Enine	Boyuna	Enine
CFTP (E-Cam)	2,1	1020	40	45	12
KFTP (Karbon)	1,6	1240	41	145	10
AFTP (Kevlar 49)	1,4	1380	30	76	5,5

5
SANDVİÇ YAPILI KOMPOZİT MALZEMELER

5.1 Giriş

Sandviç yapılı kompozitler, yüksek özgül mukavemet ve eğilme sertliği nedeniyle çok popüler hale gelen özel bir kompozit malzeme sınıfıdır. Bu malzemelerin düşük yoğunluğu, onları özellikle havacılık, uzay ve denizcilik uygulamalarında kullanım için uygun hale getirir. Sandviç yapılı kompozit malzeme kavramı MS 1849 yılına kadar geriye götürülebilir, ancak bu yapının potansiyeli ancak İkinci Dünya Savaşı sırasında gerçekleştirildiği bilinmektedir. Havacılıktaki gelişmeler, hafif, yüksek mukavemetli ve yüksek hasar toleranslı malzemelerin gerekliliğini ortaya çıkardı. Bu gereksinimleri karşılayan sandviç yapılı kompozitler, yapısal parçalarda kullanılması da olmak üzere birçok uygulama için ön sıralarda tercih edilebilir hale geldi. Hafifliği, yüksek rijitlik-ağırlık oranı, korozyon direnci, iyi yorulma direnci ve yüksek dayanıklılık gibi birçok avantajından dolayı sandviç yapılı kompozit malzemeler sivil altyapılarda giderek daha fazla kullanılmaktadır. Artık yapısal uygulamaları havacılık sektörünün dışında kara taşımacılığına ve deniz araçlarına bile yayılmaktadır [53].

Çekirdek malzeme olarak bilinen kalın ve hafif tabakanın her iki yüzeyine lamine edilmiş plakalardan oluşan malzemeye sandviç kompozit yapı denir. Bu tanımın birçok varyasyonu mevcuttur, ancak bu tür malzemelerin yapımında kilit faktör, malzemenin genel yoğunluğunu azaltan hafif çekirdek ve mukavemet sağlayan sert kabuklar olarak kalmaktadır. Sandviç yapılı kompozitin katmanlarının şematik gösterimi Şekil 5.1'de gösterilmektedir.



Şekil 5.1 Sandviç yapılı kompozite ait bileşenlerinin şematik gösterimi

5.2 Sandviç Kompozitlerde Bileşenler

Sandviç kompozitlerin esas olarak Şekil 5.1'de gösterildiği üzere dış yüzey, çekirdek olmak üzere temel olarak iki bileşene sahiptir. Genellikle köpüklerden, peteklerden veya balsa ağacından yapılan düşük yoğunluklu çekirdek malzemelere sert ve güçlü yüzey malzemelerinin yapıştırılması veya bir arada kürlenmesi ile oluşturulurlar. Kabukları çekirdek ile birleştirmek için bir yapıştırıcı kullanılırsa, yapışkan tabaka da yapıda ek bir bileşen olarak düşünülebilir. Yapışkan tabakanın kalınlığı genellikle ihmal edilir. Çünkü kabukların veya çekirdeğin kalınlığından çok daha küçüktür [54-57]. Sandviç çekirdek malzemesinin önemli bir parametresi, düzlem dışı sıkıştırma özellikleridir. Bu tür özelliklerin doğru nicel verileri, sandviç tasarımın modellenmesi ve analizi ve ayrıca etki tepkisi için çok önemlidir [58-61].

5.2.1 Çekirdek Malzemeler

Yapının performans isterlerine bağlı olarak, çekirdek malzeme grubu çok sayıda malzeme içerir. Popüler çekirdek malzemeler aşağıda açıklandığı gibi üç türe ayrılabilir;

1. Düşük yoğunluklu açık ve kapalı hücre yapılı köpükler, balsa ve diğer ahşap türleri gibi katı malzemeler
2. Hücresel formda genişletilmiş yüksek yoğunluklu petek, ağ çekirdeği gibi malzemeler
3. Oluklu formda genişletilmiş yüksek yoğunluklu kafes, oluklu levhalar gibi malzemeler.

Çekirdek malzemenin yapısı, kabuklar ve çekirdek arasındaki arayüzey temas alanını etkiler. Genişletilmiş çekirdekler yapmak için kullanılan yüksek yoğunluklu malzemeler arasında alüminyum, titanyum ve çeşitli polimerler bulunmaktadır. Çekirdek için uygun yapının seçimi, verilen spesifikasyonlara veya hizmet koşullarına göre bir sandviç yapılı kompozit tasarlamak için ek parametre sağlar. Genişletilmiş yüksek yoğunluklu malzemeleri, düşük yoğunluklu malzemelere kıyasla çok daha küçük temas alanı sağlar.

Köpükler, çekirdek malzemenin en yaygın biçimlerinden biridir. Polivinil klorür (PVC), polistiren (PS), poliüretan (PU), polieterimid (PEI) ve stiren akrilonitril (SAN) dahil olmak üzere çeşitli sentetik polimerlerden üretilebilirler. Kompozit yapılar için en çok kullanılan yoğunluklar 40 ile 200 kg/m^3 arasında değişse bile, 30 kg/m^3'ten az ve 300

kg/m^3'ten fazla yoğunluklarda tedarik edilebilirler. Ayrıca, tipik olarak 5 mm'den 50 mm'ye kadar çeşitli kalınlıklarda mevcutturlar [39].

Kapalı hücre yapılı köpük gibi çekirdeklerin kullanımı, açık hücre yapılı köpükler ve çekirdeklere göre bazı belirgin avantajlar sağlar. Kapalı hücre yapılı köpüklerin özgül basınç dayanımı çok daha yüksektir. Ayrıca açık hücreli yapılı köpükten daha az nem emiş özelliğine sahiptirler.

5.2.1.1 Polivinil klorür (PVC) Köpükler

Kapalı hücreli polivinil klorür (PVC) köpükler, yüksek performanslı sandviç yapıların tasarımı için en yaygın kullanılan çekirdek malzemelerden biridir. PVC ve poliüretanın kimyasal bir hibriti olmalarına rağmen, basitçe 'PVC köpükleri' olarak adlandırılırlar.

PVC köpükler, statik ve dinamik özelliklerin dengeli bir kombinasyon olanağı sunmakla birlikte su emilimine karşı iyi bir direnç sağlamaktadır. Ayrıca, tipik olarak -240°C ile +80°C (-400°F ile +180°F) arasında geniş bir çalışma sıcaklığı aralığına sahiptirler. Kimyasal dayanımları iyidir. Çapraz bağlı ve çapraz bağlı olmayan(doğrusal) köpükler olmak üzere iki ana PVC köpük türü bulunmaktadır. Çapraz bağlanmamış köpükler daha sert ve daha esnektir. Kıvrımlı yüzeylerde etrafından ısı verilerek şekillendirilmesi daha kolaydır. Bununla birlikte, çapraz bağlı PVC'nin eşdeğer yoğunluğundan daha düşük mekanik özelliklere, yüksek sıcaklıklara ve stirene karşı daha düşük bir dirence sahiptirler. Çapraz bağlı muadilleri daha sert ama daha kırılgandır [39].

5.2.1.2 Polimetakrilimid (PMI) Köpükler

Belirli bir yoğunluk için, ROHACELL gibi polimetakrilimid (PMI) köpükler, köpük çekirdek malzemelerin arasında en yüksek dayanım ve sertliğe sahiptir. Özellikleri yüksek boyutsal kararlılık, kapalı hücre yapısı ve yüksek yorulma ömrü içerir. Aynı zamanda yüksek sıcaklıklarda kürlenebilirler. Maliyeti ve performans özellikleri, kullanımlarının ağırlıklı olarak helikopter rotor kanatları, kanatçıklar ve basınçlı bölmelerdeki stringer profilleri gibi daha yüksek performanslı kompozit parçalarda kullanılmasına sebep olmaktadır [39].

5.2.1.3 Polistiren Köpükler

Polistiren köpükler, hafif (40 kg/m^3), düşük maliyetli ve kolay zımparalanma özelliklerinin birincil öneme sahip olduğu yelken ve sörf tahtası imalatında yaygın olarak kullanılmasına rağmen, düşük mekanik özelliklerinden dolayı yüksek performanslı bileşen yapımında da nadiren kullanılırlar [39].

5.2.1.4 Poliüretan Köpükler

Poliüretan köpükler, yalnızca orta derecede mekanik özellikler sergiler ve reçine/çekirdek arayüzündeki köpük yüzeyinin yaşlandırma ile birlikte bozulma eğilimi gösterir. Bu durum sonucunda da yüzeyde delaminasyona yol açar. Yapısal uygulamaları; takviye bileşenleri, çerçeveler veya kirişler oluşturmak için şekillendiricilerin üretimi ile sınırlıdır. Ancak hafif yüklü sandviç panellerde poliüretan köpükler kullanılabilir. Bu paneller ısı yalıtımı için yaygın olarak kullanılmaktadır [39].

5.2.1.5 Stiren Akrilonitril (SAN) Kopolimer Köpükler

SAN köpükleri, sertleştirilmiş çapraz bağlı PVC köpüklere benzer şekilde davranır. Çapraz bağlı PVC çekirdek malzemelerin statik özelliklerinin çoğuna sahiptirler, ancak çok daha yüksek uzama ve tokluğa sahiptirler. Bu nedenle, hem geleneksel hem de sertleştirilmiş PVC köpükleri kırabilecek darbe seviyelerini absorbe edebilirler. Bununla birlikte, polimeri sertleştirmek için plastikleştiriciler kullanan sertleştirilmiş PVC'lerin aksine, SAN'ın tokluk özellikleri polimerin kendisinde mevcuttur ve bu nedenle yaşlandırma ile birlikte önemli ölçüde değişmez [39].

5.2.1.6 Diğer Termoplastikler

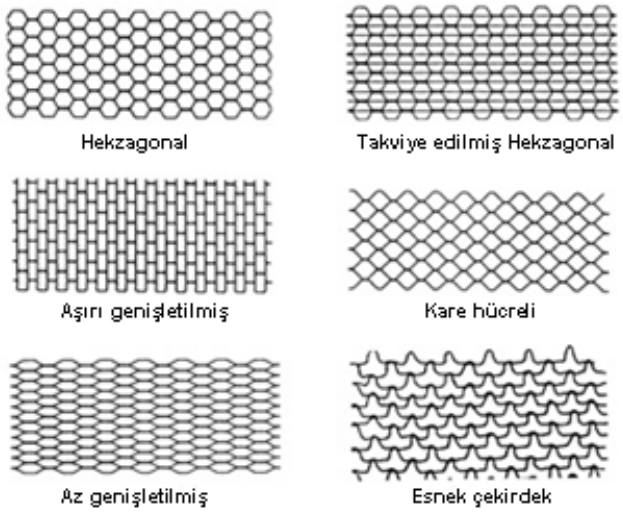
Olağanüstü yangın performansını yüksek servis sıcaklığı ile birleştiren genişletilmiş bir polieterimid/polietersülfon olan PEI köpüğü tipiktir. Pahalı olmasına rağmen bu köpük, -194°C (-320°F) ile +180°C (+355°F) servis sıcaklık aralığında yapısal, termal ve yangına karşı koruma uygulamalarında kullanılabilir. Yangına dayanıklılık spesifikasyonlarından bazılarını karşılayabildiği için uçak ve tren iç mekanları için son derece uygundur [39].

5.2.1.7 Petek Yapılar

Sandviç yapılar için çeşitli peteksi çekirdek malzemelerde mevcuttur. Bunlar, düşük mukavemet ve sertlik içeren kağıt ve türevi malzemelerdir. Düşük yük uygulamalarından (ev içi iç kapılar gibi), uçak yapıları için yüksek mukavemet ve sertlik gerektiren son derece hafif bileşenlere kadar uzanır. Petekler hem düz hem de kavisli kompozit yapılar halinde işlenebilir ve aşırı mekanik kuvvet veya ısıtma olmadan eğri yüzey formlarına uygun olarak uygulanabilmektedir [62].

Termoplastik petekler genellikle ekstrüzyonla üretilir, ardından kalınlığa göre dilimlenebilmektedir. Diğer petekler (kağıt ve alüminyumdan yapılanlar gibi) çok aşamalı bir işlemle yapılmaktadır. Bu durumlarda, boyutları genellikle 1.2 m x 2.4 m olan ince malzeme tabakalarına dönüşümlü, parallel ve ince yapışkan şeritleri basılır. Ardından tabakalar, yapışkan sertleşirken ısıtılmış bir preste istiflenir. Alüminyum petek durumunda, levha yığını daha sonra kalınlığı boyunca dilimlenmektedir. Dilimler blok formunda olup daha sonra sürekli altıgen hücre şekillerinden oluşan bir tabaka oluşturmak için yavaşça gerilir ve genişletilmektedir.

Kağıt petek durumunda, yapıştırılmış kağıt yaprakları yığını, birkaç fit kalınlığında büyük bir petek bloğu oluşturmak için hafifçe genişletilir. Genişletilmiş formda tutulan bu kırılgan kağıt petek bloğu daha sonra bir reçine tankına daldırma işleminden sonra süzülür ve bir fırında sertleştirilmektedir. Bu daldırma reçinesi sertleştikten sonra blok, gereken nihai kalınlıklarda dilimlenmek için yeterli güce sahip olur.



Şekil 5.2 Peteksi çekirdek malzemenin hücre tipleri [62].

Her iki durumda da, genleşme sürecindeki çekme derecesi değiştirilerek, her biri farklı mekanik ve taşıma/örtü özellikleri olan düzenli altıgen biçimli hücreler veya aşırı genişlemiş (uzamış) hücreler üretilebilir. Bu bağlı yapım yöntemi nedeniyle, petek levhanın 0° ve 90° yönlerinde farklı mekanik özelliklere sahip olacaktır [31], [39]. Şekil 5.2'de peteksi çekirdek malzemelerin hücre tipleri şematik olarak verilmiştir.

Yüzey malzemeler genellikle fiber takviyeli kompozitlerden olsa da, ahşap, termoplastikler (örn. melamin), alüminyum veya çelik gibi metal saclar dahil olmak üzere uygun özelliklere sahip hemen hemen her türlü sac malzeme olabilir. Petek yapısının hücreleri sert bir köpükle de doldurulabilir. Bu, yüzey malzemeler için daha geniş bir bağ yüzeyi sağlamakla beraber hücre duvarlarını sabit tutarak çekirdeğin mekanik dayanım özelliklerini arttırır. Aynı zamanda termal ve akustik yalıtım özelliklerini arttırır.

Petek yapılı malzemelerin özellikleri, hücrelerin boyutuna (ve dolayısıyla sıklığına) ve ağ malzemesinin kalınlığına ve sağlamlığına bağlıdır. Levhaların kalınlığı tipik olarak 3-50 mm arasında değişebilir ve panel boyutları tipik olarak 1.2 m x 2.4 m'dir, ancak 3 m x 3 m'ye kadar levhalar üretmek mümkündür.

Petek çekirdekler, sert ve çok hafif laminatlardan oluşabilmektedir. Ancak çok küçük yapıştırma alanları nedeniyle, laminat kaplamalara gerekli yapışmanın sağlanabilmesi için epoksiler gibi yüksek performanslı reçine sistemleriyle veya yüzeysel olarak yapışkan filmlerde kullanılabilmektedir. Bu yapışkan filmler yüzey malzeme ile çekirdek malzeme arasındaki yüzey yapışma dayanımını arttırsa da yapıya harici ağırlık olarak olumsuz yönde etkisi olmaktadır.

- **Alüminyum Petek Yapı**

Alüminyum petek, tüm yapısal malzemeler arasında en yüksek mukavemet/ağırlık oranlarından birini sağlamaktadır. Alüminyum folyo için çeşitli geometrik hücre şekillerine (genellikle altıgen) yol açabilen birçok yapışkan bağlama konfigürasyonları vardır. Özellikler aynı zamanda folyo kalınlığı ve hücre boyutu değiştirilerek de kontrol edilebilebilmektedir. Petek genellikle genleşmemiş blok formunda sağlanır ve hat boyunca bir tabaka halinde gerilmektedir [39], [62].

İyi mekanik özelliklerine ve nispeten düşük fiyatına rağmen alüminyum petek, tuzlu su ortamındaki potansiyel korozyon sorunları nedeniyle büyük deniz yapıları gibi bazı uygulamalarda dikkatli kullanılmalıdır. Bu durumda, iletkenlik galvanik korozyonu

şiddetlendirebileceğinden, peteğin karbon kaplamalarla doğrudan temas etmemesini sağlamak için de özen gösterilmelidir.

- **Nomex Petek Yapı**

Nomex petek Nomex kağıdından yapılır. Selüloz lifleri yerine Kevlar(aramid) bazlı bir kağıt türüdür. İlk kağıt petek, yüksek mukavemete ve yangın direncine sahip bir petek çekirdeği üretmek için fenolik reçineye batırılır. Kaplamalardaki fenolik reçineler ile birlikte uçaklar için hafif iç panellerde yaygın olarak kullanılır. Alev geciktirici uygulamalarda kullanım için özel sınıflar da yapılabilir; bu petek hücreler ilave bağ alanı ve izolasyon için fenolik köpükle doldurulmuştur [39].

Nomex petek yapı, yüksek mekanik özellikleri, düşük yoğunluğu ve iyi uzun vadeli stabilitesi nedeniyle yüksek performanslı havacılık dışı bileşenlerde giderek daha fazla kullanılmaya başlıyor.

- **Termoplastik Petek Yapı**

Diğer termoplastiklerden yapılan çekirdek malzemeler ağırlıkça hafif ve daha kolay geri dönüşüm sağlayabilme kabiliyeti gibi faydalı özellikler sunar. Başlıca dezavantajları, çekirdek ve yüzey malzemesi arasında iyi bir ara yüzey bağı sağlamanın zorluğu ve nispeten düşük sertlikleridir. Yüksek yüklü yapılarda nadiren kullanılmalarına rağmen, basit iç panellerde kullanışlı olabilirler. Kullanılan en yaygın polimerler ve önemli özellikleri şunlardır:

  - Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) - sertlik, darbe dayanımı, tokluk, yüzey sertliği ve boyutsal kararlılık için
  - Polikarbonat - UV stabilitesi, mükemmel ışık iletimi, iyi ısı direnci ve kendiliğinden sönme özellikleri
  - Polipropilen - iyi kimyasal direnç için
  - Polietilen - genel amaçlı, düşük maliyetli bir çekirdek malzeme [39].

5.2.1.8 Diğer Malzemeler

Ahşap, mikroskobik ölçekte sentetik bal peteğinin hücresel altıgen yapısına benzeyen bir yapıya sahip olduğu için 'doğanın peteği' olarak tanımlanabilir. Ahşap yüzeylerin düzlemine dik olarak ilerlediği bir sandviç yapıda kullanıldığında, elde edilen bileşen, insan yapımı peteklerle yapılanlara benzer özellikler gösterir. Bununla birlikte, mevcut

olan çeşitli kimyasal işlemlere rağmen, tüm ahşap çekirdekler nemli ortamlara karşı hassastır. Laminat veya reçine ile iyi bir şekilde çevrelenmezse çürüyebilirler [39].

En sık kullanılan ahşap öz, uç damarlı balsadır. Balsa ağacı çekirdek malzemeleri ilk kez 1940'larda, suya inişin tekrarlanan etkisine dayanacak şekilde alüminyum kaplı ve balsa çekirdekli uçan tekne gövdelerinde ortaya çıktı. Bu performans, denizcilik endüstrisinin, fiber takviyeli kompozit yapımında çekirdek malzeme olarak uç taneli balsa kullanmaya başlamıştır.

Balsa çekirdeği, bir destek kumaşı üzerinde 3 ile 50 mm kalınlığında konturlu uç damarlı tabakalar ve 100 mm kalınlığa kadar sert damarlı tabakalar olarak mevcuttur. Bu tabakalar, vakumlu torbalama, prepreg veya RTM gibi basınca dayalı üretim prosesleri için reçine kaplı olarak sağlanabilmektedir. Balsanın dezavantajlarından biri, tipik olarak yüksek minimum yoğunluğa sahiptir. Bu sorun, balsanın laminasyon sırasında büyük miktarlarda reçineyi emebilmesi gerçeğiyle daha da kötüleşir, ancak köpüğü önceden mühürlemek bunu azaltabilmektedir [39].

5.2.2 Yüzey Malzemeler

Yüzey olarak kullanılmak üzere çok çeşitli malzemeler mevcuttur; Alüminyum, titanyum ve çelik gibi metal levhalar ve fiber takviyeli kompozitler, yüzey malzemelerinin yaygın örneklerinden bazılarıdır. Fiber takviyeli kompozitler, sandviç yapılı kompozitin özelliklerini değiştirmek için malzeme özellikleri yönlü olarak kontrol edilebilir kılmaktadırlar. Fiber takviyeli polimerler, düşük yoğunlukları ve yüksek özgül dayanımları nedeniyle dış yüzey malzemesi olarak geniş bir alanda kullanılmaktadır. Polimer kompozitlerin yüzeylerde kullanılmasının sunduğu bir diğer avantaj, aynı polimerin hem yüzeyi hem de çekirdeği oluşturmak için kullanılabilmesidir. Polimerin çekirdek ve kabuk arasında çapraz bağlanması, polimerin kuvvetine eşit bir yapışma mukavemeti seviyesi sağlayacaktır. Bu, yapıştırıcı gereksinimini ortadan kaldırarak yüzey malzeme yapının ayrılmaz bir parçası haline getirilmesini sağlar.

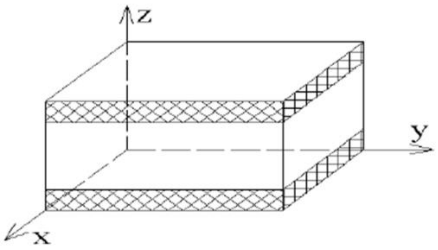
Yüzeyi ve çekirdeği birbirine yapıştırmak için bir yapıştırıcı kullanıldığında, hem yüzey malzemeler hem de çekirdek malzemeleriyle uyumlu olmaları gerektiğinden, yapıştırıcıların seçimi çok önemli hale gelir. Yapışma istenen mukavemet seviyesinde olmalı ve dış ortamlardan etkilenmemelidir.

Metal malzemeli bileşenler konu olduğunda, çekirdek ve dış yüzeyleri birbirine bağlamanın bir yolu olarak kaynaklama veya sert lehimleme kullanılır. Yapıştırıcıların kullanımıda uygundur. Ancak bir veya daha fazla bileşenin ısıya dayanamadığı durumlarda sınırlıdır. Yapının bu kısmı çevre ile doğrudan temas halinde olduğundan, yüzey malzemesinin seçimi çalışma ortamı açısından önemlidir. Tüm sandviç yapılı kompozit malzemelerin korozyon, ısı transfer özellikleri, termal genleşme özellikleri, nem emme ve diğer özellikleri, uygun yüzey malzemesi seçimi ile kontrol altında alınabilmektedir.

5.3 Sandviç Yapılı Kompozitlerin Özellikleri

Bir kompozit malzemenin önemli bir avantajı da, özelliklerini çalışma mekanizmasına göre uyarlama imkanıdır. Aynı avantaj, sandviç yapılı kompozitler için de geçerlidir. Doğru çekirdek ve yüzey malzemelerinin seçimi, sandviç yapılı kompozitleri birçok uygulamaya ve çevresel koşullara uyarlanabilir hale getirir. Sandviç yapılı kompozitlerin belli başlı yaygın özellikleri aşağıda açıklanmıştır:

1. Düşük yoğunluk: Hafif çekirdek veya yüksek yoğunluklu malzemelerin genişletilmiş yapılarının seçimi, sandviç kompozitin toplam yoğunluğunu azaltır. Çekirdek hacmi, kabuk hacmine kıyasla sandviç kompozitte önemli ölçüde daha yüksektir, bu nedenle çekirdek malzemesinin yoğunluğundaki herhangi bir azalma, toplam sandviç yoğunluğu üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.
2. Eğilme sertliği: Bu özellik sandviçin yüzey kısmından gelir. Daha yüksek özgül sertlik nedeniyle sandviç kompozitler, diğer yapılara kıyasla daha düşük yanal deformasyon, daha yüksek burulma dayanımı ve daha yüksek doğal frekanslarla sonuçlanır.
3. Çekme ve basınç dayanımı: z-yönü (Şekil 5.3) özellikleri, çekirdek özellikleri tarafından kontrol edilir. x ve y yönleri (Şekil 5.3) özellikleri, kaplamaların özellikleri tarafından kontrol edilir.
4. Hasar toleransı: Çekirdek olarak esnek köpük veya ezilebilir malzeme kullanılması, sandviç malzemeyi yüksek hasar toleranslı yapıya dönüştürür. Bu nedenle köpük dolgulu veya oluklu dolgulu sandviç yapılı malzemeler ambalaj uygulamalarında popüler malzemelerdir [53].



Şekil 5.3 Sandviç kompozitin örnek gösterimi

Tablo 5.1'de sandviç yapılı kompozit malzemelerin bazı avantaj ve dezavantajları verilmiştir.

Tablo 5.1 Sandviç yapılı kompozit malzemelerin bazı avantaj ve dezavantajları [53].

Avantajlar	Dezavantajlar
Yüksek özgül eğme dayanımı	Yüksek kalınlıklı parça tasarımı
Hasar toleransının yüksekliği	Geleneksel malzemelere kıyasla maliyeti yüksek
Titreşim sönümleme kabiliyeti	İşleme pahalı
Geniş malzeme seçeneği	Hasar tamir zorluğu

5.3.1 Sandviç Yapılı Kompozitlerin Uygulamaları

Düşük yoğunluklu, yüksek dayanım ve yüksek hasar toleranslı malzemeler gerektiren çeşitli uygulamalar vardır. Hafif olmaları nedeniyle sandviç kompozitler, hava, kara veya taşımacılık için çeşitli araçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Sandviç kompozitlerin uygulama alanlarından bazıları aşağıda listelenmiştir.

- Yapısal uygulamalar: uçak, uzay aracı, denizaltı, gemiler ve tekneler, yüzey taşıma araçları, yapı malzemeleri vb.
- Ambalaj malzemeleri.
- Isı ve elektrik yalıtımı.
- Depolama tankları [63].

6
EKLEMELİ İMALAT TEKNOLOJİLERİ

6.1 Giriş

Endüstri 4.0 ya da 4. Sanayi Devrimi, birçok çağdaş otomasyon sistemini, veri alışverişlerini ve üretim teknolojilerini içeren kollektif bir terimdir. Endüstri 4.0'la sanayi, tüketicinin değişen ihtiyaçlarına anlık olarak uyum sağlayacak üretim sistemlerine ve birbirleriyle sürekli koordinasyon halinde olan otomasyon sistemlerine yönelmektedir. Eklemeli imalat, geleneksel yöntemler ile üretilmesi zor ya da imkansız olan karmaşık şekilli parçaların kısa sürede üretilmesi, nihai ürün için gerektiği kadar malzeme kullanımı ile malzeme kayıplarının önlenmesi, montajlı parçaların tek seferde üretiminin gerçekleştirilerek işçilik maliyetlerinin azaltılması, kalıba ihtiyaç duyulmadan kişiye özgü parçaların üretimine imkan vermesi eklemeli imalat teknolojilerinin genel anlamda ortaya konan en önemli avantajlarıdır. Eklemeli imalat, dijital ortamda yapılan tasarımın katmanlar halinde 3 boyutlu yazıcılarda üretimi gerçekleştirerek 3 boyutlu fiziksel nesnelerin üretilmesine imkan tanır. Bu sayede üretimi zor veya karmaşık geometrili parçaların üretimi gerçekleşebilmektedir [7], [8].

Eklemeli imalat teknolojileri ülkelerin stratejik anlamda önde gelen araştırma konularından birini oluşturmaktadır. Bu doğrultuda tüm dünyada gerek akademik gerekse de firma düzeyinde önemli yatırımlar yapılmaktadır. Ülkemizde de özellikle son on yılda önemli bir gelişme gösteren bu teknolojilerin günlük hayatta dahi etkilerine rastlanmaktadır [7], [8].

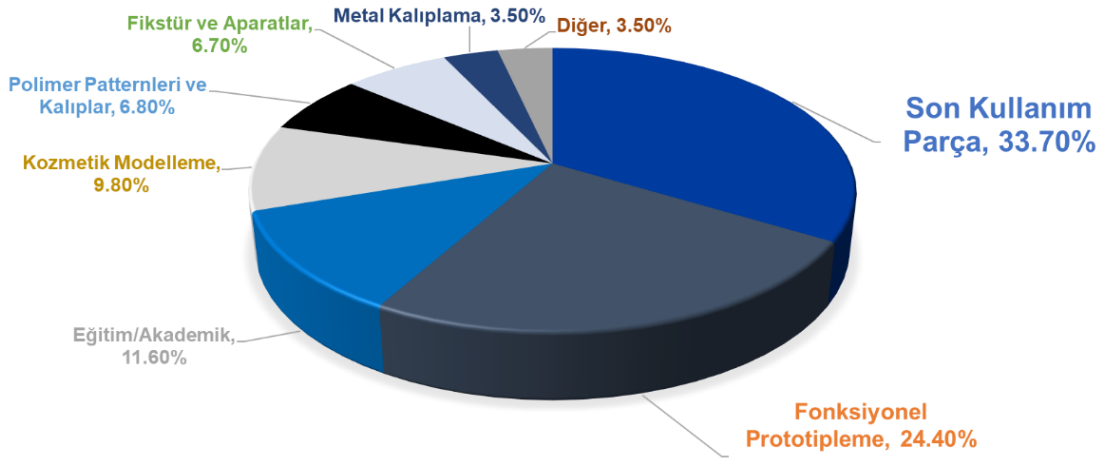
1980'lerin başında tanımaya başladığımız eklemeli imalat, tam olarak 1983 yılında Charles Hull, Stereolitografiyi icat etmesi ile eklemeli imalatın kurucusu olarak kabul edilmektedir. 1980'lerin sonunda Stratasys, EOS, 3D Systems gibi eklemeli imalat şirketlerin kurulması ile ilk eklemeli imalat makine donanımı sağlandı [7], [8].

1990'larda polimer ve metal malzemeler için Toz Yataklı Füzyon (Powder Bed Fusion) ve Bağlayıcı Püskürtme (Binder Jetting) tanıtıldı. İlk başlarda kullanım uygulama alanları esas olarak hızlı prototipleme uygulamalarıydı. 2000'lerde eklemeli imalat (Eİ), daha fazla endüstriyel deneme uygulamasına geçti. Alman takım tezgahları üreticileri ilk kez Eİ pazarına girdi. Ancak Eİ endüstrisinin ana odak noktası hala çok düşük hacimli parça

üretimleri gerçekleştirebilen toz yataklı füzyon sistemler ve (material extrusion) malzeme ekstürüzyonu ile sınırlıydı [7], [8].

Geçtiğimiz on yıl boyuncada yeni nesil girişimcilerin ortaya çıkması ile yeni eklemeli imalat teknolojileri patent sahibi firmalar tarafından tanıtıldıkça endüstrinin ileri imalat sistemleri alanında daha da büyümesini sağlamaktadır. Bu sayede Eİ, son on yılda gelişimlerle birlikte yaygın olarak kullanılan bir imalat teknolojisidir [6].

Wohlers raporunda yayınlanan çalışmaya göre; 2022'de eklemeli imalatla üretilen parçaların %58,1'ini son kullanım parçalar ve fonksiyonel prototipler oluşturmaktadır. Fikstür ve Aparat tarafı ise gelişime açık konumda bulunmaktadır [6]. Bu raporun verileri Şekil 6.1'de gösterilen grafikte yer verilmiştir.

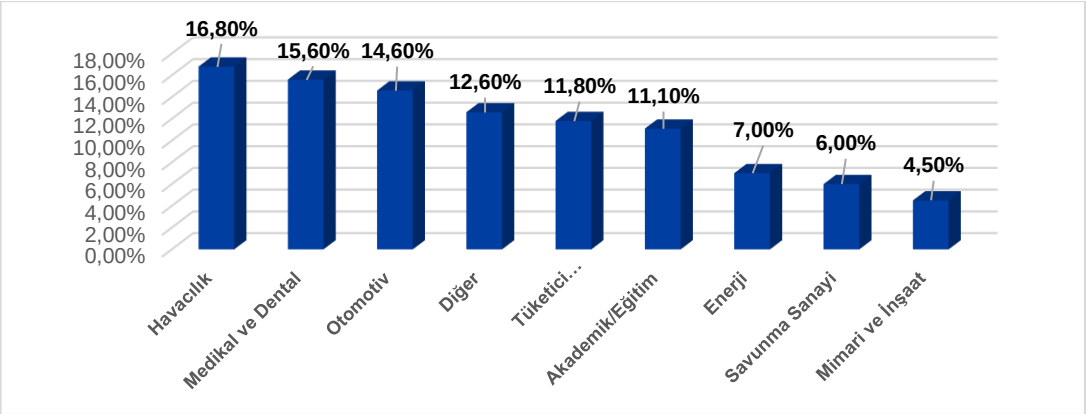


Şekil 6.1 Wohlers 2022 yılı eklemeli imalat raporuna göre sektörel uygulama oranları [6].

6.2 Havacılık Endüstrisinde Eklemeli İmalat

Eklemeli imalat, ilk günlerinden beri havacılık endüstrisi için önemli bir yer edinmiştir. Havacılık şirketlerinin eklemeli imalat teknolojilerine önemli ölçüde yatırım yapmaları havacılık için yeni ve heyecan verici fırsatların kilidini açtığını söylemek mümkündür.

Wohlers raporuna göre, eklemeli imalat 2022'de en yaygın kullanılan sektörlerin başında havacılık gelmekle birlikte medikal - dental ve otomotiv sektörleri takip etmektedir [6]. Şekil 6.2'de bu durumu gösteren bir dağılım grafiği verilmiştir.



Şekil 6.2 Wohlers 2022 raporuna göre eklemeli imalatın sektörel dağılımı [6].

Günümüzde ticari havacılığın uçak geliştirme ve bakımında teknoloji kullanımından uzaya kadar, eklemeli imalatın çeşitli ugulamalarına odaklanılmaktadır. Uydu, roket ve daha fazlası için endüstrinin yenilikçi eklemeli imalat teknolojileri kullanılmaktadır [9]. Şekil 6.3'te uydu ve uydu aviyonikleri için hazırlanan tasarımların görselleri verilmiştir.



Şekil 6.3 (a) Stratasys üretimi modern bir uydu için tasarlanmış bir aviyonik kutusu (b) uydu görseli [9], [64].

Eklemeli imalatın yeni havacılık girişimleri için hayati önem taşıdığına dair derinlemesine bir analiz bölümü ve son yıllarda havacılık alanındaki en büyük eklemeli imalat çalışmalarından bazıları derlenmiştir [7], [9].

Havacılık endüstrisi için önemli olan şirketlerden Honeywell'in eklemeli imalatı sivil havacılık için kullanımı hakkında, Lufthansa Technik'ten Hamburg'daki Adaptive AM Merkezi ve Boom Supersonic'ten eklemeli imalatın süpersonik uçağının geliştirilmesinde geleneksel imalat yöntemlerine göre sağladığı üretim avantajlarından çalışmalara yer verilmiştir [7], [9].

En yenilikçi ticari alanların çoğu, öncü şirketlerden SpaceX, Relativity, Launcher, Orbex ve Roketlab gibi eklemeli imalat uzay parçaların üretimlerini, tedarik zincirini tamamen geleneksele göre değiştirdiği görülmektedir. Bu önde gelen şirketlerin eklemeli imalat yatırımları sayesinde gelecektede ayakta kalabilecek şirketler arasında öngörülmektedir.

Eİ ile hemen hemen her şirket; roket motorlarını, uydu bileşenlerini oluşturan (bileşenin performansını ve maliyet oranını sürekli olarak iyileştiren) son derece kompleks ve özelleştirilebilir tasarımlarda üretebilmektedir. 3dpbm Research'ün 2022'de 1,3 milyar ile 2,6 milyar dolar arasında havacılık firmaların eklemeli imalat yatırımların olduğunu söylemektedir [7], [9].

Geleceğe daha yakından bakan Mitsubishi Electric şirketide uzay eklemeli imalatında oldukça yer alan bir şirkettir. Reçine bazlı üretim yöntemleri ile uzay aracı bileşenlerinin, fırlatma ve yörünge yerleştirme streslerine dayanma standartlarında Eİ kullanarak geleneksel imalat yöntemlerine göre daha ince ve daha hafif yapılması sağlanarak hem toplam uydu ağırlığını hem de fırlatma maliyetlerini azaltmak amaçlanmaktadır [7], [9].

Orion aracının ana yüklenicisi Lockheed Martin Space, eklemeli imalat laboratuvarında 7 adet profesyonel 3 boyutlu yazıcılara sahiptir. Özellikle uygulama alanlarında keşif görevlerinde kullanılan uzay araçlarının tasarım sınırlarını ortadan kaldırmak ve parçaların kapsamlı bir şekilde test edilmesi ile doğru revizyonların en kısa sürede gerçekleştirebilmek amaçlanmaktadır [7], [9].

Son kullanım ürün olarak, uzay ortamında kullanıma uygun PEKK bazlı Stratasys'in Antero ESD malzemesi, mükemmel mukavemet, termal özelliklere ve ESD (elektrostatik boşaltma) özelliği sayesinde kullanılmaya başlanmıştır [7], [9]. F900 sistemi ile üretilen ambar kapağı ve kullanım yeri Şekil 6.4'te verilmiştir.



Şekil 6.4 F900 sistemi ile üretilmiş olan ambar kapağı üretimi ve kullanım yeri [9], [65].

2014 yılında kurulan BoomSupersonic, ürün geliştirme ve son kullanım parçalarını Eİ ile üretmektedir. Eklemeli imalat stratejisine ilk olarak Stratasys ile bir anlaşma yaparak başlamıştır. Bu anlaşma Stratasys'in FDM teknolojisine sahip olan F900 AIS (Aircraft Interior Solution) sisteminde yüzlerce kalıp ve prototip üretmek için 7 yıllık bir ortaklık ile anlaşma sağlanmıştır. Aynı zamanda XB-1 gösteri uçağının son kullanım parçalarıda Velo3D ile titanyum alaşım malzemesinden üretilmektedir. Özellikle 340 adetten fazla

metal bileşenin geleneksel metal imalat yöntemlerine göre daha hafif, ağırlığı azaltılmış tasarıma sahip çelik ve alüminyum bileşenleri kullanmak mümkün kılmıştır [9].

Günümüzde Boom supersonic; Stratasys patentine sahip FDM teknolojilerinden F900, Fortus 450mc ve F370 yazıcılarına sahiptir. XB-1'in inşası sırasında Boom ekibi 550'den fazla matkap bloğunu Stratasys sistemlerinden üretilmiştir [9]. Üretilen ürünler ve hava aracı üzerindeki fikstür denemeleri Şekil 6.5'te gösterilmiştir.



Şekil 6.5 Boom Supersonic üretim hattı (a) FDM teknolojisi ile üretilen parçaları (b) Ultem malzemeleri ile üretilen fikstür ve aparat denemeleri [9], [66].

FIT AG, Türk Havacılık ve Uzay Sanayii için DfAM (eklemeli imalat için tasarım) parçaları üretmeyi planlamaktadır. Türk Havacılık ve Uzay Sanayii, havacılık ve uzay imalatında deneyimli ve aynı zamanda FIT AG'nin yan kuruluşudur [9].

Havacılık ve uzay için ISO-9100 sertifikasına sahip FIT AG, uçaklar için yenilikçi yapısal parçalar tasarlamak, gelenekesel imalat ile üretilmesi zor olan dron ve uydu bileşenlerinin tasarım ve üretim süreçlerini optimize etmek için çalışmalar yürütmektedir [9].

Aurora insansız hava aracı (İHA) üretimlerinde, Stratasys'in FDM sistemlerinde diğer üretim yöntemlerinin aksine, mukavim ancak daha hafif bileşenlerin üretilmesine izin veren tamamen kapalı, içi boş bir yapı oluşturmada tasarım ve performans kabiliyetlerinin avantajlarını göstermektedir [9], [67]. Aurora insansız hava aracına ait görsel ve kanat yapısı Şekil 6.6'da gösterilmiştir.



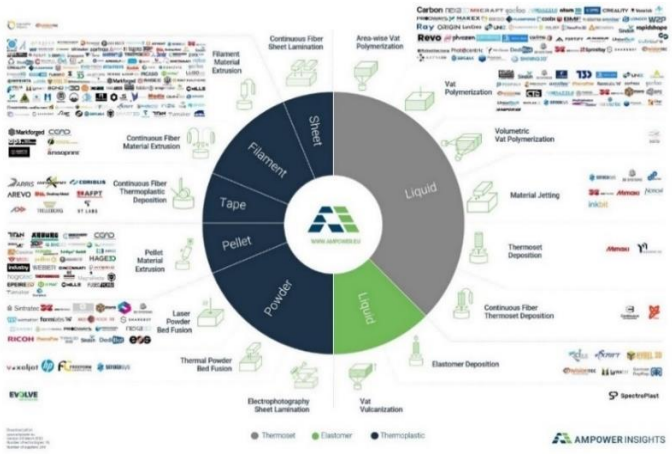
Şekil 6.6 Aurora insansız hava aracı, (a) Aurora insansız hava aracı, (b) Aurora insansız hava aracında Ultem 9085 malzeme ile üretilen kanat yapısalı [68].

6.3 Polimer Eklemeli İmalat Teknolojisi

1980'lerde ilk eklemeli imalat teknolojisi Stereolitografi (SLA) işlemine dayalı olarak ticarileştirilen polimer eklemeli imalat teknolojisi, bugün neredeyse her gün yenileri eklenen 16'dan fazla farklı polimer eklemeli imalat teknolojileri ile bu ekosisteminin genişlediğini görmekteyiz.

2019 yılında şirketlerin yüzde 72'si polimer AM sistemleri kullanırken, yüzde 49'u metal AM sistemleri kullanmaktadır. SmarTech Analysis'in yakın tarihli bir raporuna göre, HP'nin Multi Jet Fusion'ı gibi Toz Yataklı Füzyon (PBF) teknolojileri, yüksek verimlilikte üretimler gerçekleştiren endüstriyel sistemlerdir. Öte yandan, Fused Filament Fabrication (FFF) profesyonel olarak en çok kullanılan malzeme ekstrüzyon teknolojisidir. Son olarak, Stereolitografi (SLA) ve Digital Light Processing (DLP) gibi reçine bazlı teknolojilerin üretimlerinin daha fazla kullanıldığını görmek mümkündür [69].

Polimer eklemeli imalat teknolojilerinde kullanılan termosetler, elastomerler ve termoplastiklerin polimer gruplarından birçok farklı malzeme mevcuttur. Polimer eklemeli üretim filament esaslı malzeme ekstrüzyonu teknolojileri arasında en yaygın olanıdır. Polimer eklemeli imalat için teknoloji haritasında süreçler ASTM/ISO 52900 standartına göre alt bölümlere ayrılmaktadır. Bu bölümlerde bazıları hala nispeten genç bir olgunluk derecesine sahiptir. Globalde yaygınlaşmış en önemli prosedürlere ilişkin bir genel bakış ve sınıflandırma mevcuttur [69]. Şekil 6.7'de ASTM/ISO 52900 standartına göre polimer eklemeli imalat için teknoloji haritası verilmiştir.

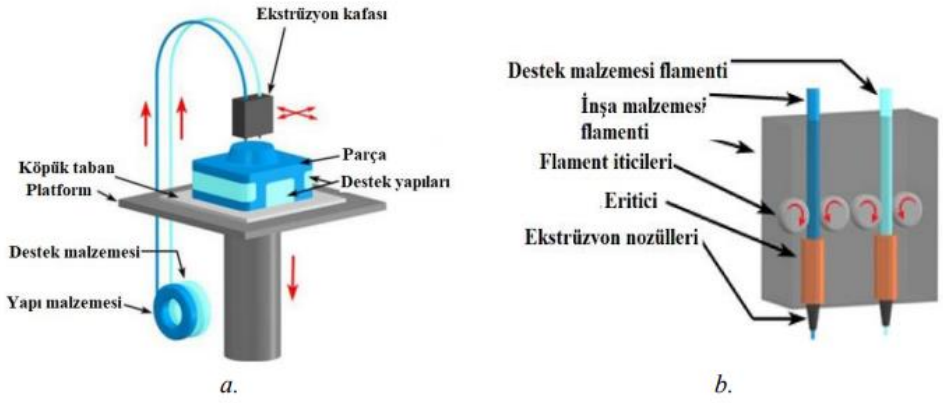


Şekil 6.7 ASTM/ISO 52900 standartına göre polimer eklemeli imalat için teknoloji haritası [69].

6.4 FDM (Fused Deposition Modeling) Teknolojisi

1989 yılında Stratasys şirketinin kurucusu Scott Cramp tarafından icat edilen ve ticarileştirilen FDM teknolojisi, en yaygın kullanılan ekstrüzyon tabanlı eklemeli imalat teknolojidir. Şekil 4.9'da FDM teknolojisinin gerçekleştiği cihaz görülmektedir. Dünyadaki 3B yazıcıların yaklaşık %70'inin kullanıldığı teknoloji olarak tahmin edilmektedir. Türkçeye "Eriyik Yığma Modelleme" olarak çevrilebilmektedir.

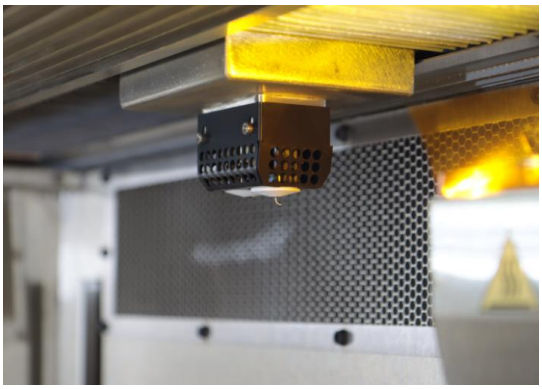
Malzeme ekstrüzyonu, Şeki 6.8'de gösterildiği gibi malzemenin ısıtıcı bir başlık yoluyla katman katman üretim tablasına döküldüğü eklemeli imalat yöntemidir.



Şekil 6.8 a) FDM Teknolojisi çalışma prensibi b) ekstrüzyon kafası [70].

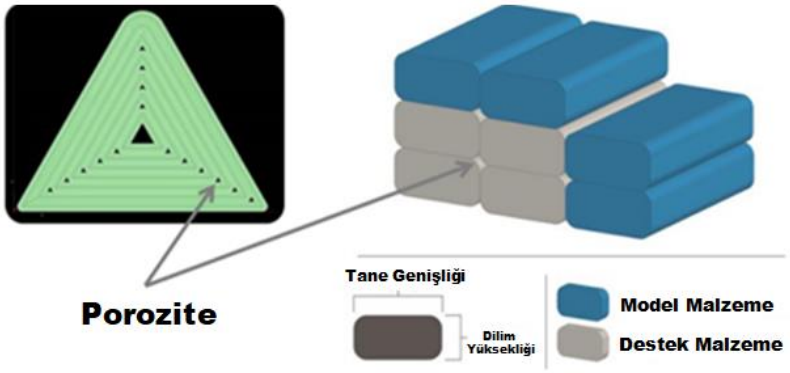
FDM teknolojisi ile, ekstrüde edilmiş termoplastik malzemelerin birikmesine dayanan parçalar oluşturulmaktadır. Bu işlemde, modelde kullanılacak termoplastik malzeme, Şekil 6.8'de gösterildiği gibi filament (makara, yapı malzemesi) şeklinde kullanılmaktadır.

Filament formundaki termoplastik malzemesi, ekstrüzyon kafasına beslenir ve Şekil 6.8'de görüldüğü gibi, sıcaklık kontrollü nozul uç vasıtası ile üretim tablasına dökülür. Ekstrüzyon kafasının içinde filament yarı katı ergiyik bir hale gelir. Ekstrüzyon kafasının hareketi bilgisayar tarafından kontrol edilir. Ekstrüzyon metodu, kullanılan malzemenin nozuldan geçebilecek bir yarı katı haline gelmesi prensibine dayanır. FDM teknolojisinde ısıtıcı bobinler sayesinde, malzeme ekstrüzyon aşamasında katılaşmaz ve nozuldan geçer. Bu nozul ekstrüde edilmiş filamentin şeklini ve boyutunu belirler. Bunun sonucunda da parçanın üretim hızına veya ölçüsel hassasiyetine etkisi olmaktadır [8], [71] .



Şekil 6.9 Sıcaklık kontrollü nozul uç [72].

Tasarıma göre parçada boş olan kısımlar aşağıdaki Şekil 6.9'da görüleceği üzere yine filament halinde olan destek malzemesi ile doldurulur. Bu şekilde baskı kafası, tabladaki parçanın her kesit bölümünün tam bir taslağını izler.



Şekil 6.10 FDM model ve destek malzeme tasarımı [73].

Tüm sistem, plastiğin erime noktasının hemen altındaki bir sıcaklıkta olan, dış ortamla temas halinde olmayan bir haznenin içinde gerçekleşir. İşlemler tamamlandıktan sonra boşluklar için kullanılan şekil 6.10'da da temsili olarak gösterilen destek malzemesi elle sökülerek veya özel olarak hazırlanan solüsyona daldırılıp çözündürülerek bertaraf edilir. Böylece nihai parça elde edilmektedir [74].

6.4.1 Malzemeler

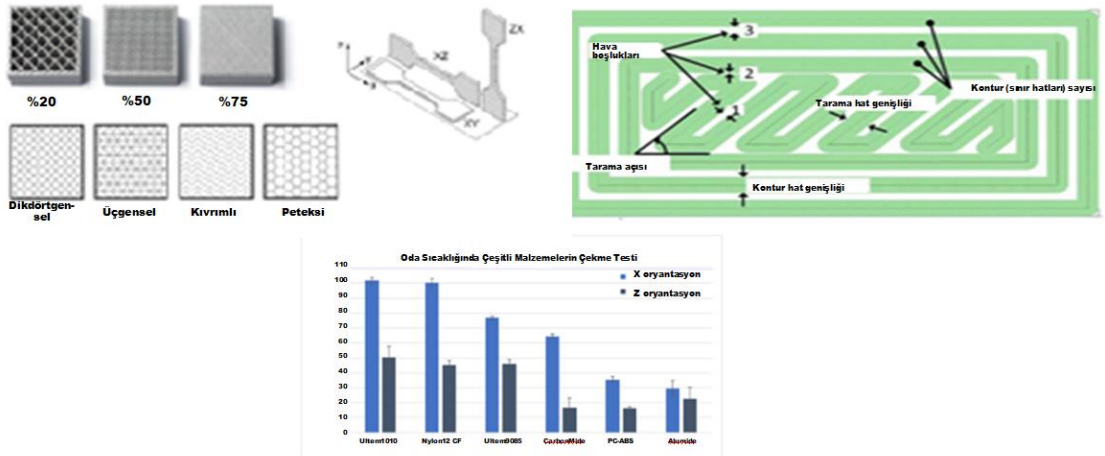
Günümüzde, genel kullanım polimerleri olan PLA, ABS gibi malzemeler yerini şu anda polimer pazarına hakim olan, zorlu ortamlara ve yüksek sıcaklıklara dayanabilen güçlü, fonksiyonel malzemeler için geliştirilen polimerlere bırakmaya başlamış durumdadır. Eklemeli imalat kullanıcısı olan şirketlerin %35'i yüksek performanslı polimerler ile çalışmaya başlamıştır. Bu eğilime yanıt olarak, malzeme tedarikçileri özellikle

ULTEM, PEEK ve PEKK gibi yüksek performanslı termoplastikler geliştirmek ve eklemeli imalat teknolojileri ile Şekil 6.11'de gösterildiği gibi farklı uygulamalarda kullanıma yönelik malzeme gelişmeleri artmıştır. Bu teknolojileri geliştiren kimya şirketlerinden malzemeler arasında birkaç isim vermek gerekirse SABIC, Victrex, Solvay, Covestro, KIMYA ve Evonik yer almaktadır. Yüksek performanslı malzemelerin geliştirilmesi, endüstriyel uygulamalarda eklemeli imalatın ilerlemesi için çok önemli yer edinmektedir [8], [75].



Şekil 6.11 Yüksek performanslı malzeme uygulama örnekleri a) anten b) gimbal muhafaza kabuğu [75].

FDM teknolojisi ile üretilem malzelerin proses parametrelerinin aralarındaki etkileşimlerin şekil 6.12'de görüldüğü üzere mekanik performansı etkilediği görülmektedir. Raster açısı, kontür sayısı, katman kalınlığı, baskı hızı, hava boşuğu, nozul sıcaklığı vb. önemli parametreler araştırılmıştır.



Şekil 6.12 FDM üretim süreci ve sonuçları (a) FDM proses parametreleri, (b) farklı proses parametrelerine göre mekanik dayanım farklılıkları [76-78].

Katman kalınlığın azalması, termal döngülerde bir artışa neden olduğu ve bu artış sonucu malzemede artık gerilmelerin birikmesine yol açtığı bilinmektedir. Öte yandan katman kalınlığın azalması, katmanlar arası daha az gözeneklilik ve daha gelişmiş bir yüzey kalitesi çözünürlüğü sunmaktadır. Üretim hızındaki değişim malzeme akışını etkilediği ve malzeme morfolojisini etkilediği bilinmektedir.

6.4.1.1 Polieterimid (PEI)

Ticari adı Ultem 1010 olan Polieterimid (PEI), 1970'lerin başında J.G. Wirth tarafından geliştirilmiştir. Polimer zincirinde hem eter bağları hemde imit grupları olan amorf bir termoplastiktir. Üretim işlemi; bir dikarboksilik asit anhidritin, m-fenilen diamin ile imidizasyonu ile gerçekleştirilir.

PEI, yüksek ısı dayancı, sertlik, darbe mukavemeti, yüksek mekanik mukavemet, iyi elektriksel özellikler ve geniş kimyasal dayanım özellikleri sunmaktadır.

PEI, uzun süreli ısı dayancı, boyutsal kararlılık ve yüksek sıcaklıklarda fiziksel ve mekanik özelliklerin mükemmel stabilitesi ile bilinen bir termoplastiktir. 217 °C'lik bir Tg'ye (camsı geçiş sıcaklığı) sahiptir ve 200 °C'e kadar öngörülebilir sertlik ve mukavemet gösterebilmektedir. PEI, ısı direnci, solvent direnci nedeniyle de tıbbi veya kimyasal cihazlarda kullanılmaktadır. Ek olarak, savunma havacılık, ulaşım, otomotiv uygulamaların çeşitli bileşenlerinde kullanıma uygunluğu bilinmektedir.

Polieterimid (PEI) malzemenin eklemeli imalatta kullanımı, FDM teknolojisinde, filament şeklinde beslenmesiyle gerçekleşmektedir. Stratasys'in Fortus serisi sistemlerinde kullanılan Polieterimid (PEI), elle sökülebilen destek malzemesi ile birlikte kullanılmaktadır [8], [79]. Şekil 6.13'de F900 cihazı ve bu cihaz ile Polieterimid (PEI) malzemesi kullanılarak üretilen bir kanat parçası gösterilmiştir.



Şekil 6.13 Stratasys F900 ile üretilen Ultem1010 kanat parçası

6.4.1.2 Karbon fiber takviyeli Poliamid 12

Ağırlıkça %35 kırpılmış karbon fiber takviyeli poliamid 12 ticari ismiyle Nylon12 CF malzemesi Stratasys tarafından ticarileşmiştir. Yüksek mukavemet/ağırlık oranı, yüksek esnemezlik ve FDM malzemeleri arasındaki en yüksek eğilme mukavemetili malzemeler arasında yer alan ve sertlik özellikleri sayesinde zorlu uygulamalar için tercih edilebilir yüksek performanslı kompozit malzemesidir. Tablo 6.1'de Ultem 1010 ile Nylon12 CF malzemelerinin özellikleri verilmiştir.

Tablo 6.1 Ultem 1010 ile Nylon 12CF malzemelerinin özellikleri [80].

Malzeme Özellikleri	ULTEM™ 1010 resin	Nylon12 CF
Çekme Mukavemeti (XZ)	79.2 MPa	83.5 MPa
Çekme Modülü (XZ)	3.04 GPa	9.46 GPa
Isıl Dayanım	214.1 °C	168.1 °C
Çekme Uzaması (Elongation at break)	4.0%	2.4%
Eğilme Mukavemeti (Kırılma anındaki) ZX	81 MPa	62.4 MPa
Compression Properties (XZ)	245 MPa	110 MPa
Izod Darbe Dayanımı Çentiksiz (XZ)	260 J/m	346 J/m

6.5 GrabCAD Print&Insight Yazılımlarında Baskı Tasarımı

GrabCAD Print, sadece tüm Stratasys sistemlerinde üretilecek olan parçaların takım yolu hazırlanmasında kullanılabilen ve hem CAD hem mesh uzantılı dosyalarını destekleyebilen bir dilimleme yazılımıdır.

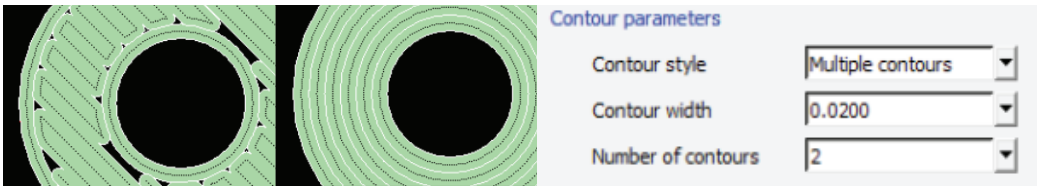
Insight yazılımı, destek yapılarını ve malzeme ekstrüzyon yollarını otomatik olarak dilimleyerek ve oluşturarak CAD programınızın STL çıktısını Stratasys F370 ve Fortus sistemlerinde üretilecek şekilde hazırlar. Maksimum kontrol için kullanıcılar, FDM işleminin hızı ve malzeme kullanımının yanı sıra parçaların görünümünü, dayanıklılığını ve hassasiyetini belirleyen parametreleri Grabcad Print'e göre daha detaylı ve manuel olarak düzenlenebilir.

Baskı tasarımında, maksimum dayanıklılıkta ve en pürüzsüz yüzey kalitesinde parça üretimi için yönlenmeyi optimize etme, malzemelerin baskı hızı, destek yapıların kolay bertaraf edinebilmesi için destekleri malzemeleri özelleştirebilme, üretim parçalarınıza gömülü donanım veya ek materyel yerleştirmek istediğinizde üretimi duraklatabilmek üretim süreçlerini detaylı takip edebilmek için kullanıcı kullanım kolaylıklarına sahip bir arayüze sahiptir. Tasarım, mühendislik ve üretim ekipleri, verimliliği ve iş hacmini en üst düzeye çıkarmak için baskı tasarım takip ağı kurabilir ve 3 boyutlu üretim verilerini birbirleri ile paylaşabilir.

Parça hazırlamada, mekanik ve yüzey kalitesine etki eden en önemli takım yolu parametreleri:

- İç doluluk yoğunluğu ve stili,
- Katman kalınlığı,
- Baskı oryantasyonu (düzlemi),
- Kontur sayısı ve genişliği,
- Destek sütunu,

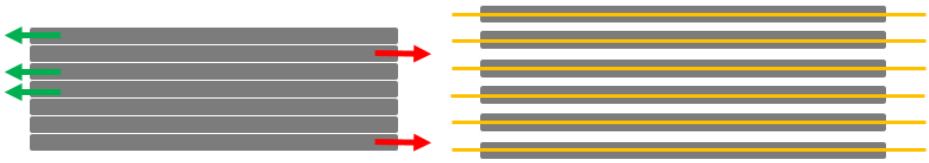
şeklindedir. Şekil 6.14'de görüldüğü üzere takım yolunun kontür genişliği veya kontür sayısı değerleri değiştirilerek boşluklu katmanların oluşumu engellenebilmektedir. Bu sayede üretilen parça daha dayanıklı ve yüzey kalitesi çok daha iyi olmaktadır.



Şekil 6.14 a) boşluklu takım yolu b) kontür adeti ve genişliği değiştirilmiş takım yolu c) parametre setleri [81].

Parça içerisindeki raster dolgularının birbirleri arasında boşluk bulunmaması, bazı durumlarda geometriye bağlı olarak iç stresi arttırabilmektedir.

Şekil 6.15'de görüleceği üzere boşluksuz olarak üretilen modellerin iç yapılarındaki rasterlar düzensiz ve zıt yönlerde çekme kuvvetine neden olacağından modelin çarpılmasına sebep olmaktadır. Modelin çarpılamadığı durumlarda ise zaman ile iç stres, modeli yorarak çatlama problemleri yaşatabilmektedir. Bu problemi önleyebilmek için aşağıdaki tedbirler alınabilir.



Şekil 6.15 a) dolu raster dolguları – zıt yönlerde çekmeye çalışan yükler çarpılmaya sebep olabilir, b) boşluklu (sparce) raster dolguları

Kullanılan malzeme, modelin geometrisi ve iç yapıdan dolayı üretim esnasında çarpılmalar ve parçanın köşelerinden kalkma problemleri görülebilmektedir. Bu gibi durumlarda kafada bulunan extruder uçları parçanın kalkan yüzeylerine sürterek pürüzlü bir yüzey meydana getirdiği gibi uçların ömrünü de kısaltmaktadır.

Üretim esnasında oluşan bu çarpılmayı önlemek için modelleri destek sütunundan oluşan bir tabana sıkıca kavranacak şekilde üretmek gerekmektedir. Şekil 6.16'daki gibi, modelin altına belirli aralıklarla pimler eklenerek destek geometrisinin bu ayakları sıkıca sarması sağlanır ve böylelikle çarpılma probleminin önüne geçilebilmektedir.



Şekil 6.16 a) Destek kolonu eklenmiş numune takım yolu görüntüsü b) destek kolonu parametreleri program arayüzü

6.6 Ardıl İşlem ile Destek Malzemelerin Temizlenmesi

Stratasys FDM teknolojisinde, yüksek performanslı malzemelerden PEI ve PEKK bazlı malzemeler harici tüm malzemelerin destek yapıları çözünebilir özelliktedir. Şekil

6.17'de Özel P400SC WaterWorks™ temizleme solüsyonu ile çözelti tankına atılan parçalar, destek malzemesinin kimyasal türüne göre 70-85°C sıcaklıkta ve ultrasonik bir titreşim ile parçalar destek yapısının sarfiyatına göre belirli bir süre tank içerisinde tutularak çözünme sağlanır.



Şekil 6.17 Çözünebilir destek malzemesi (a) destekli üretilen parça, (b) çözündürücü tanka konulan parçalar [82].

PEI ve PEKK bazlı malzemelerin destek yapıları ise şekil 6.18'de görüleceği üzere çeşitli el aletleri yardımıyla, nihai parçanın yüzeyinin çizilmemezi veya oyulmaması için özen gösterilerek sökülmektedir [8], [71], [76].



Şekil 6.18 (a)Söküm için kullanılan aletler, (b)sökülebilir destek malzemesi [83].

7
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

7.1 Kullanılan Malzemeler

Sandviç yapılı kompozit malzeme üretiminde epoksi ana matris malzemesi olan karbon fiber takviyeli prepreg malzeme kullanılmıştır. Kompozitin fiber malzemesi ise dokuma 0/90° yönlü 3k filamente sahip PAN temelli üretim yöntemi ile üretilmiş olan karbon fiberdir. Belirtilen matris ve fiber malzemesine ek olarak sandviç yapının merkezini (göbeğini) oluşturulan ve bu çalışmada etkileri gözlemlenen çekirdek malzemeleri olarak PVC köpük, PMI köpük, PEI ticari ismiyle ULTEM 1010, karbon fiber takiyeli PA12 ticari ismiyle Nylon 12CF (ağırlıkça %35 karbon fiber katkılı), aramid bazlı hekzagonal ve aşırı genişletilmiş bal peteği malzemeler kullanılmıştır.

7.1.1 Yüzey Malzemesi

Sandviç yapılı kompozit üretiminde dış yüzey tabakalarında kullanılacak olan takviye elemanı seçiminde en önemli etkenler; takviyenin şekli, uzunluğu, yönlenmesi ve malzemesidir. Bu etkenler baz alındığında takviye elemanı olarak karbon fiber belirlenmiş ve dokuma olan türünün de kullanılmasına uygun olduğuna karar verilmiştir. Bunun sebebi kompozit malzemeye uygulanacak yükün tüm malzeme tarafından taşınmasını sağlamaktır. Kullanılan dokuma karbonun özellikleri Tablo 7.1'de belirtilmiştir.

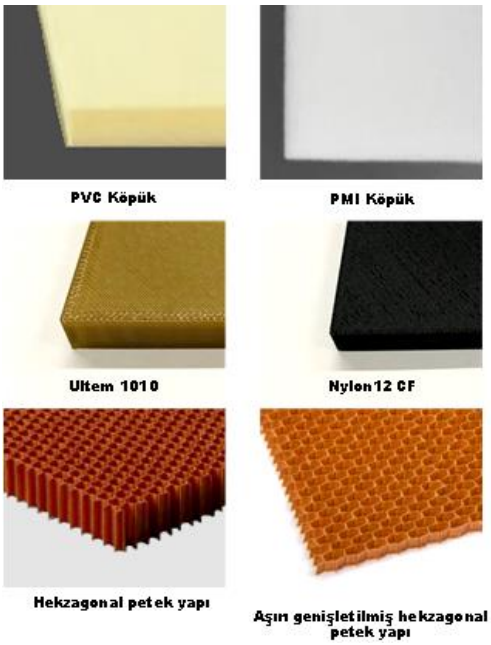
Tablo 7.1 Kullanılan fiber malzemelerin özellikleri

Fiber Malzemesi	Kısa Kod	Filament çapı (μm)	Dokuma Yönü	Ağırlık (g/m^2)	Malzeme Yoğunluğu (g/cm^3)	Ağırlıkça Matris Oranı	Ağırlıkça Takviye Oranı
Dokuma karbon	CD 245	5-7	0/90°	245	1.79	32	68

Çalışmada özgül ağırlığı 1,14 g/cm^3 olan epoksi ana matris malzemesi kullanılmıştır. Bu epoksi reçine mükemmel kimyasal dayanıma, mükemmel fiziksel ve elektriksel özelliklere, yüksek termal dayanıma ve iyi yapışmaya sahiptir. Yukarıda bahsedilen fiber ve matris malzemeleri çalışmada kullanılan karbon prepreg hammaddeleridir. Çalışmada kodlama olarak CD245 prg kodu ile adlandırılacaktır.

7.1.2 Çekirdek Malzemeler

Bu çalışmada çekirdek malzemeleri olarak yapısal köpükler, bal peteği yapıları yenilikçi teknoloji olan 3 boyutlu yazıcıdan üretilen yüksek mukavemetli termoplastik malzemelerin kullanılmasına karar verilmiştir. Bu bağlamda kullanılan malzeme türleri PVC köpük, PMI köpük, PEI (Ultem 1010), karbon fiber takiyeli PA12 (Nylon 12CF), aramid bazlı hekzagonal ve aşırı genişletilmiş peteksi yapı olarak belirlenmiştir. Şekil 7.1'de bu malzemelerin görüntüleri verilmiştir.



Şekil 7.1 Kompozit yapıda kullanılan çekirdek malzemeler

Tablo 7.2'de yapısal köpüklerin özellikleri verilmiştir. PVC köpük, kapalı hücreli, çapraz bağlı ve yüksek sıcaklığa dayanıklı köpüktür. Kompozit uygulamaları için üstün dayanım/ağırlık oranına sahiptir. Mükemmel ısı yalıtımına sahiptir. Epoksi reçine sistemleriyle uyumludur. PMI köpük ise, kapalı hücreli, sert, orta hücre boyutuna sahiptir. Prepreg serim işleminde kullanımı için idealdir. Seçilen her iki malzeme türüde yüksek sıcaklık dayanımına sahiptir.

Tablo 7.2 Yapısal köpüklerin özellikleri

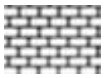
Malzeme	Kısa Kod	Renk	Yoğunluk (kg/m^3)	Kalınlık (mm)	Kimyasal Dayanımı	Nem Dayanımı
PVC Yapısal Köpük	PVC-82YSD	Açık Sarı	72-92	10	Yüksek	Az
PMI Yapısal Köpük	PMI-77YSD	Beyaz	70-84	10	Yüksek	Orta

Tablo 7.3'de ise bal peteği yapılarının özellikleri verilmiştir. Belirtilen peteksi yapılar aramid esaslı fiber plakadan hücresel tipine göre şekil verilerek kesilmiş olup hücre ölçüsüne uygun konumda birbirlerine yapıştırılmıştır. Dış yüzey için fenolik reçine kaplaması gerçekleştirilerek bu yapı malzemeleri üretilmiştir. Bu çalışmada yapısal köpük ve peteksi yapılar Tablo 7.2 ve 7.3'teki yoğunluk ve ölçülerde temin edilerek sandviç yapılı kompozitler üretilmiştir.

Tablo 7.3 Bal peteği yapılarının özellikleri

Malzeme	Hücre tipi	Hücre Ölçüsü (mm)	Yoğunluk (kg/m^3)	Kısa Kod
Aramid fiber/Fenolik reçineli	Hekzagonal 	3.2	82	AH-3.2-82
Aramid fiber/Fenolik reçineli	Hekzagonal 	3.2	80	AH-3.2-80
Aramid fiber/Fenolik reçineli	Hekzagonal 	4.8	64	AH-4.8-64

Tablo 7.3 Bal peteği yapılarının özellikleri (devamı)

Aramid fiber/Fenolik reçineli	Aşırı genişletilmiş hekzagonal 	4.8	64	AGH-4.8-64

Tablo 7.4'de ise 3 boyutlu yazıcıdan üretilen yüksek mukavemetli termoplastik malzemelerin özellikleri verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan Polieterimid (PEI) amorf yapıya sahip termoplastik malzemesidir. PEI monomer yapısının molekül formülü $C_{37}H_{24}O_6N_2$ ve molekül ağırlığı 592.61 g/mol'dür. Birincil, ikincil ve üçüncül aminlere sahip bir alkil zincir yapısına sahiptir. Polieterimid'in sahip olduğu eter bağının sayesinde yapıya süneklilik katarken, yapısında bulunan aromatik imid sayesinde ise daha yüksek rijitliğe sahip olmaktadır.

Poliamid 12, $(C_{12}H_{23}NO)_n$ formülüne sahip, poliamidlerden oluşan sentetik naylon polimeridir. Her biri 12 karbona sahip olan ω-aminolaurik asit veya laurolaktam monomerlerinden yapılmaktadır. Poliamid 12, kısa zincirli alifatik naylonlar ve poliolefinler arasında özellikler göstermektedir. Düşük su emme ve yoğunluğu, 1.01 g/mL, nispeten uzun hidrokarbon zincir uzunluğundan kaynaklanır. Poliamid 12 ayrıca kimyasallara dayanıklıdır.

Tablo 7.4 Yüksek mukavemetli termoplastik malzemelerin özellikleri

Malzeme Özellikleri	Polieterimid (PEI)	Karbon Fiber Takviyeli Poliamid 12 (PA12)
Kod	ULTEM™ 1010	Nylon 12CF
Çekme Mukavemeti (XY)	64 MPa	76 MPa
Çekme Modülü (XY)	2,771 MPa	7,529 MPa
Isıl Dayanım (HDT 1.82 MPa)	216 °C	143 °C

Tablo 7.4 Yüksek mukavemetli termoplastik malzemelerin özellikleri (devamı)

Kopma Uzaması	3.3%	1.9%
Eğme Mukavemeti	112 MPa	142 MPa
Izod Darbe Mukavemeti Çentiksiz	779 J/m	310 J/m
Özgül Sertlik	1.6 x 106 m^2/s^2	6.5 x 106 m^2/s^2
Özgül Yoğunluk	1.29 g/cm^3 (ASTM D257 23 ℃)	1.19 g/cm^3 (ASTM D257 23 ℃)

7.2 Kullanılan Üretim Methodu ve Numunelerin Hazırlanması

Bu bölümde yürütülen çalışmalar eklemeli imalat ile çekirdek malzeme üretimi, plaka üretimi, üretilen plakalardan numunelerin hazırlanılması ve kodlandırılması şeklinde 4 başlık altında incelenmiştir.

7.2.1 Geleneksel İmalat ile Çekirdek Malzeme Üretimi

Geleneksel imalat yöntemleri ile üretilen çekirdek malzemelere ahşap, balsa, çeşitli peteksi yapılar ve çeşitli yapısal köpükler gibi çok yönlü malzeme grupları olsada bu çalışmada önceki bölümlerde bahsedilen PVC ve PMI köpük, aramid fiber bazlı fenolik reçineye sahip peteksi yapı malzemelerinin uygun özelliklerde temini gerçekleştirilerek sandviç yapılı kompozit üretiminde kullanılmıştır.

7.2.1.1 Yapısal Köpük Üretimi

PVC köpük, iç içe geçen bir polimer ağı aracılığıyla PVC ve Poliüretan'dan oluşur. Her iki madde de karıştırılarak bir kalıba dağıtıldıktan sonra kapatılır ve ısıtılır. Tam yoğunluğuna ulaştığında ve sertleştiğinde, belirli ölçülerde ve kesme formlarında kesilerek kullanıma hazır hale getirilmektedir.

Termoplastik köpük işlemlerinde, her bir hücreyi kaplayan ince polimer hücre duvarları ile kapalı hücre yapısına sahip köpük elde etmek önemli olmaktadır. Bu yapıyı sağlamak için, hücre büyümesi süreç boyunca kontrol edilmeli, sıcaklık aşırı yüksek ise polimer erime kuvveti düşük etkili bir hücre kopması olmaktadır. Sıcaklık çok düşükse, bu daha uzun köpüklenme sürelerine ve polimerin viskozitesinde artışa sebep olmaktadır. Plastik işleme, kimyasal değişim veya fiziksel özelliklerde kalıcı bir değişiklik meydana getirmektedir. Köpükler ekstrüzyon, enjeksiyon, sıkıştırma, şişirme, kaplama, takvim, rotasyonel kalıplama yöntemleri ile imal edilebilmektedir.

7.2.1.2 Bal Peteği Üretimi

Petek yapı, düz Nomex kağıt malzeme tabakalarına yapışkan şeritler, kademeli bir düzende basılarak imal işlemine başlanılmaktadır. Daha sonra, kağıt tabakaları bir araya istiflenir ve genişlemeden önce petek bloğu oluşturmak üzere sertleştirme işlemi için kürlemeye tabi tutulmaktadır. Genişletilmiş bir petek bloğu oluşturarak kenarlarından genişletilir ve hekzagonal hücre veya aşırı genleştirilmiş hücre tipine genişletildikten sonra genişletilmiş kağıt petek hücre yapısı, fenolik reçineye daldırılarak fırında kürleme işlemine tabi tutulmaktadır. Yapı kürlendikten sonra bloklar halinde istenen kalınlıkta petek levhalara kesilerek nihai plaka formunu almaktadır.

Petek, en yaygın hücresel tipi olan standart hekzagonal yapının yanında hücrelerin dikdörtgen göründüğü oluklu veya aşırı genişletilmiş yapı tiplerini oluşturmak için boyuna olan yönünde aşırı genişletilebilmektedir. Aşırı genişletme işlemi, hekzagonal peteksi yapıdaki çekirdeğe kıyasla boyuna olan yöndeki özelliklerini arttırma ve enine olan yöndeki kesme özelliklerini azaltma eğiliminde olmaktadır.

Bu çalışmada 7. Bölümde bahsedilen peteksi yapılardan hekzagonal ve aşırı genişletilmiş hekzagonal olmak üzere iki tip hücre yapısına sahip peteksi yapı temin edilerek sandviç yapılı kompozit üretimi yapılmıştır.

7.2.2 Eklemeli İmalat ile Çekirdek Malzeme Üretimi

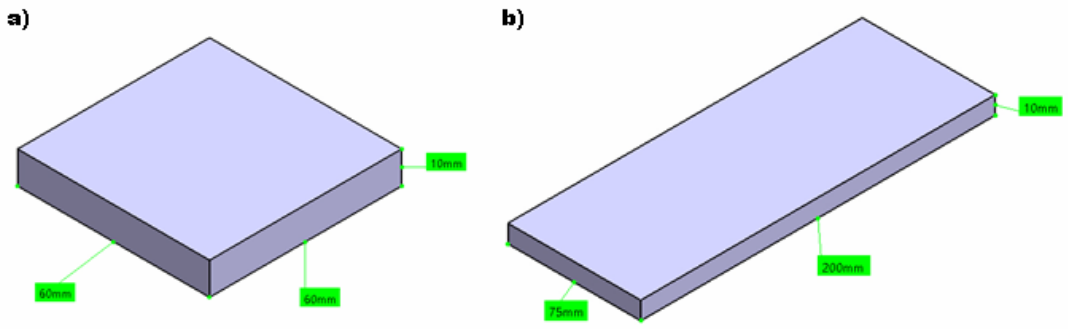
Ticari olarak, Stratasys Ultem 1010 ve Nylon 12CF ismiyle bilinen polieterimid ve karbon fiber takviyeli poliamid 12 malzemeleri, bu çalışmada sandviç yapılı kompozit malzemelerin çekirdek yapısında kullanılması ve geleneksel çekirdek yapılarına göre

kıyaslanması amacıyla Stratasys marka Fortus 450mc model 3 boyutlu yazıcıdan her biri sadece XY oryantasyonunda +/- 0.127 mm hassasiyetle üretilmiştir. Bu yazıcının yazdırma hacminin maksimum boyutları 406x355x406 mm'dir. Çekirdek malzemelerin üretimi, +90 3B Dijital fabrikada bulunan Stratasys Fortus 450mc cihazında üretilmiş olup Şekil 7.2'de görseli verilmektedir.



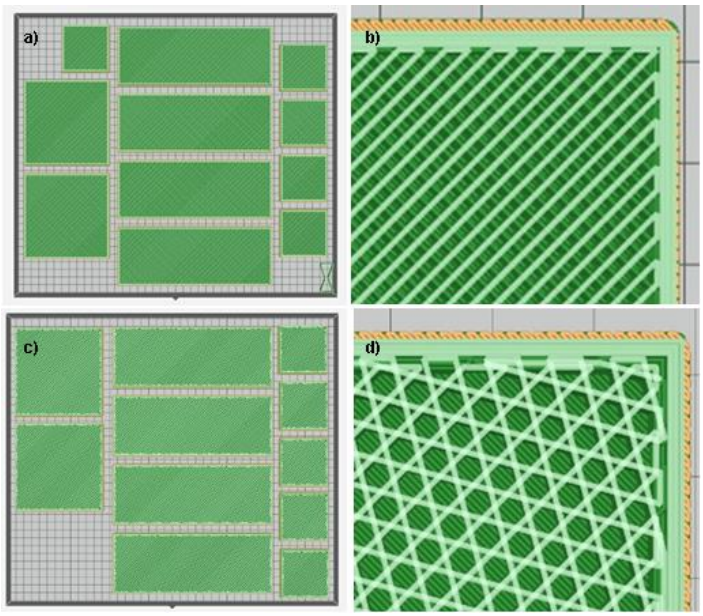
Şekil 7.2 Stratasys Fortus 450mc Cihazı

Tüm numuneler üretildikten sonra boyutsal bir inceleme yapılmış olup herhangi bir uygunsuzluk görülmemiştir. Çekirdek malzemelerin CAD tasarımı CATIA programı aracılığıyla katı model olarak yapılmış olup Şekil 7.3'de görselleri verilmiştir.



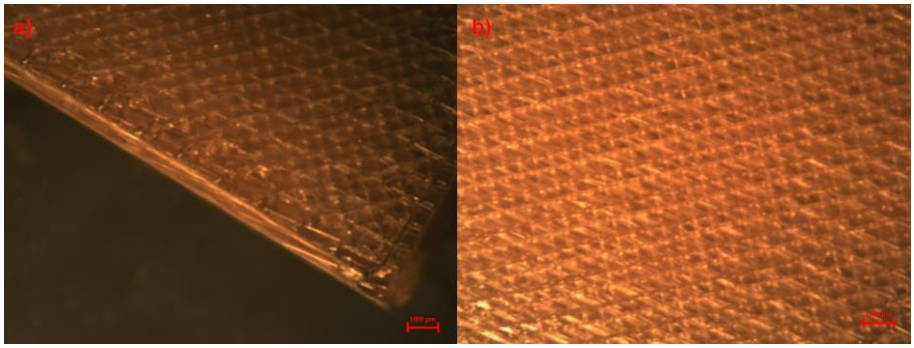
Şekil 7.3 CATIA numune tasarım görüntüleri (a)basma deneyi numune tasarımı , (b)eğme deneyi numune tasarımı

Tasarımı yapılan çekirdek malzemelerin GradCAD Print yazılımı üzerinden 3 boyutlu yazıcıda basımını sağlayan .stp uzantılı dosyaları hazırlanmıştır. Bu modellemeler hazırlanırken polieterimid (Ultem 1010) ve karbon fiber takviyeli poliamid 12 (Nylon 12CF) malzemelerde önerilen optimum takım yolu parametreleri referans alınmıştır. Bu parametreler Tablo 7.5'de verilmiş olup Şekil 7.4'de malzeme basımı için takım yolu ve iç doluluk stilleri GrabCAD Print program dosyasında ön izleme formatında gösterilmiştir. Fortus 450mc yazıcıda tüm numuneler XY düzlem oryantasyonunda üretilmiştir. Eğme testi için malzeme başına 5 adet ve basma testi için malzeme başına 5 adet numune üretilmiştir.



Şekil 7.4 GrabCAD Print'te üretilen çekirdek malzemelerin takım yolu görüntüsü, (a) Poliamid 12 (Nylon 12CF) test numunelerinine ait , (b) Poliamid 12 (Nylon 12CF) test numunelerinin iç katmanlarına ait yakınlaştırılmış, (c) Polieterimid (Ultem 1010) test numunelerinine ait , (d) Polieterimid (Ultem 1010) test numunelerinin iç katmanlarına ait yakınlaştırılmış

Şekil 7.5'de malzeme basımında son katmana ait mikroskop altındaki görüntüsü verilmiştir. Malzeme basımında tasarlanan takım yolunda ilk ve son 5 katmanı için takım yolu Şekil 7.5'de gösterildiği gibi üretilmiştir. Toplamda 38 katman halinde üretimi yapılmış olup kalan 28 katman ise Şekil 7.4'de b ve d görselleri ile gösterildiği gibi sparse ve hexagram formunda üretilmiştir. Şekil 7.6'da ise GrabCAD Print yazılımında numunelerin üretimi öncesi katman simülasyonu gösterilmektedir. Bu görselde taban yığını ve atılan destek malzemelerinin konumu verilmiştir.

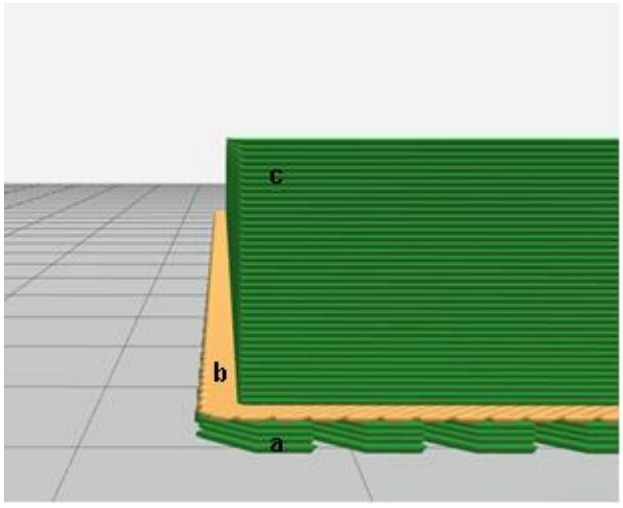


Şekil 7.5 %60 yoğunluğunda hekzagram iç doluluk yapısına sahip polieterimid çekirdek malzemenin mikroskop altındaki görüntüleri

Tablo 7.5'de polieterimid (Ultem 1010) ve karbon fiber takviyeli poliamid 12 (Nylon 12CF) malzemelerinin üretim parametreleri verilmiştir.

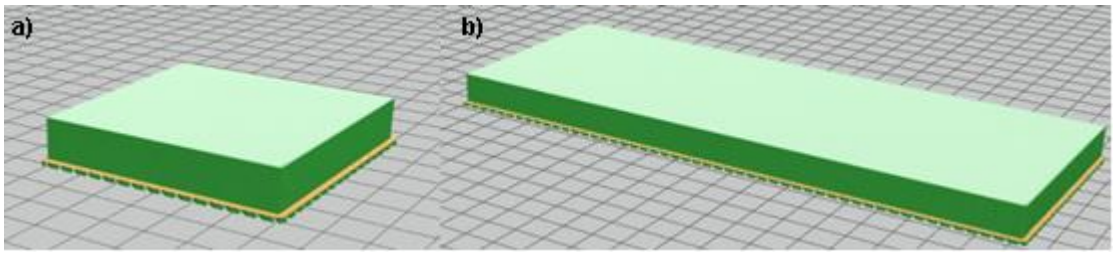
Tablo 7.5 Ultem 1010 ve Nylon 12CF malzemelerinin üretim parametreleri

Takım Yolu Parametreleri	ULTEM 1010	Nylon 12CF
İç doluluk stili	Hexagram	Sparse
İç doluluk yoğunluğu	%60	%35
Katman kalınlığı	0.254 mm	0.254 mm
Kontur kalınlığı	1.524 mm	1.524 mm
Kontur sayısı	3	3
İç doluluk açısı	45°	45°
Destek malzemesi	SUP9000B (Polieter Sulfon)	SR-110 (Akrilik ko-polimer)
Destek sütunu	Var	Var



Şekil 7.6 GrabCAD Print yazılım arayüzünde numune yan kesiti (a) taban yığını (raft), (b) destek malzemesi, (c) ana modelin katman görüntüsü

Şekil 7.7'de Ultem1010 malzemeye ait eğme ve basma testleri için üretilen numunelerin GrabCAD Print stp dosya görselleri verilmiştir.



Şekil 7.7 GrabCAD Print'te hazırlanan üretim modellemeleri (a) basma test numunesine ait çekirdek malzeme, (b) eğme test numunesine ait çekirdek malzeme

7.2.3 Plaka Üretimi ve Test Numunelerinin Hazırlanması

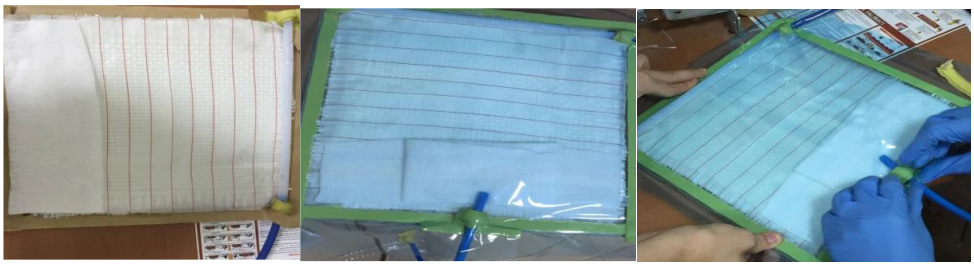
Sandviç yapılı kompozit malzemelerin üretimi için 1500x1000 mm boyutlarında düz alüminyum plaka kalıbı kullanılmıştır. Kalıp yüzeyi temizleme işlemlerinin tamamlanmasının ardından yüzey için karbon prepreg ve çekirdek malzeme için önceki bölümde bahsedilen malzemeler kullanılarak serim işlemi tamamlanılmıştır. Bu aşamada plakalar vakum torbalama yöntemi ile üstü kapatılıp vakum altına alınmıştır.

Sandviç yapılı kompozit plaka üretimi için ölçüleri 1500x2000 mm olan metal plaka kullanılmıştır. Otoklav için yapılan ön serim hazırlığı şu şekildedir:

1. Kalıp yüzeyi aseton ile temizlenip, ayırıcı sürülür,
2. 4 kat CD245 ppg serilir,
3. Numune sırasına göre çekirdek malzeme serilir,
4. 4 kat CD245 ppg serilir,
5. Plaka yüzeyine delikli naylon ve 1 kat keçe üst üste yerleştirilir,
6. Yüzey vakum torbasıyla kapatılır.

Yalnızca yukarıdan harici olarak 2 adet Bal peteği çekirdek malzemeli numunelerde arayüzey kalitesini arttırmak için kullanılan adhesif film yüzey malzemeleri ile arasına eklenmiştir.

Bu işlemlerin ardından hazırlanan kalıp otoklava yerleştirilmiştir. Plaka üretiminde vakum kaynağı olarak otoklav kullanılmıştır. Otoklavdaki proses öncesi vakum torbalama için yapılan hazırlık şekil 7.8'de görülmektedir.



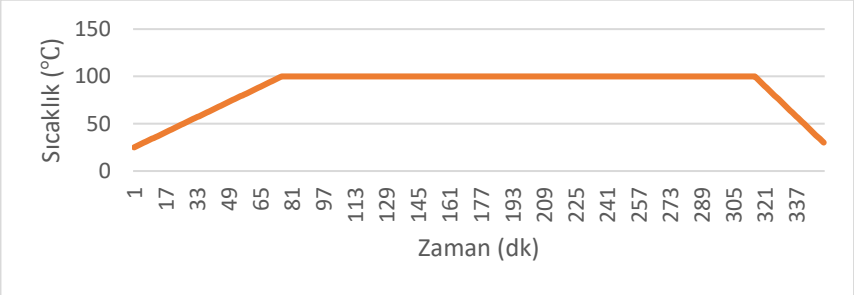
Şekil 7.8 Vakum torbalama hazırlık aşaması

Otoklav yardımı ile fazla havanın sistemden alınması sağlanmıştır. Üretim için oluşturulan sistem şekil 7.9'da gösterilmektedir. Her plaka için de üretim koşulları ve sistemi sabit tutulmuştur.



Şekil 7.9 Otoklav sistemi

Plakaların imalatı için otoklavda 2 bar'lık basınç altında 100 °C sıcaklıkta üretilmiştir. Kür çevriminde uygulanan proses şartları şekil 7.10'da gösterilmektedir.



Şekil 7.10 Otoklav kür çevrim (sıcaklık/zaman) grafiği

Üretilen plakalar daha sonra yapılacak olan bazı mekanik testler için ayrı ayrı boyutlarda kesme işlemine tabii tutulmuştur. Bu çalışma için test numuneleri belirtilen standartlar doğrultusunda Şekil 7.11'de verilen testere ile üretilen plakalardan kesilerek hazırlanmıştır.



Şekil 7.11 Test numunelerinin kesiminde kullanılan testere

Çalışmada farklı çekirdek malzemelerinden oluşan sandviç yapılı kompozitler kullanılmıştır. Hazırlanan bu numuneler için bazı isim kodlamaları kısa bir kod haline getirilmiştir. Test numunelerinin hazırlandığı plakalara ait kısa kodlandırılması ve içerikleri Tablo 7.6'da verilmiştir.

Tablo 7.6 Test plakalarına ait numunelerin kısa kodlandırılması

Kısa Kod	Açıklaması
S-PVC	PVC köpük kullanılan sandviç yapılı kompozit
S-PMI	PMI köpük kullanılan sandviç yapılı kompozit
S-PEI	ULTEM™ 1010 kullanılan sandviç yapılı kompozit
S-PA12	Nylon 12CF kullanılan sandviç yapılı kompozit
S-AH-3.2-82	Aramid fiber, hekzagonal, 3.2 mm hücre ölçülü, 82 kg/m^3 yoğunluğa sahip sandviç yapılı kompozit
S-AH-3.2-80	Aramid fiber, hekzagonal, 3.2 mm hücre ölçülü, 80 kg/m^3 yoğunluğa sahip sandviç yapılı kompozit
S-AH-4.8-64	Aramid fiber, hekzagonal, 4.8 mm hücre ölçülü, 64 kg/m^3 yoğunluğa sahip sandviç yapılı kompozit

Tablo 7.6 Test plakalarına ait numunelerin kısa kodlandırılması (devamı)

S-AGH-4.8-64	Aramid fiber, aşırı genişletilmiş hekzagonal, 4.8 mm hücre ölçülü, 64 kg/m^3 yoğunluğa sahip sandviç yapılı kompozit
S-AH-4.8-64-A	Aramid fiber, hekzagonal, 4.8 mm hücre ölçülü, 64 kg/m^3 yoğunluğa sahip adhesiv film kullanılarak üretilen sandviç yapılı kompozit
S-AGH-4.8-64-A	Aramid fiber, aşırı genişletilmiş hekzagonal, 4.8 mm hücre ölçülü, 64 kg/m^3 yoğunluğa sahip adhesiv film kullanılarak üretilen sandviç yapılı kompozit

7.3 Mekanik Deneyler

Sandviç yapılı kompozit malzemelere mekanik deneyler kapsamında eğme deneyi ve basma deneyi uygulanmıştır. Tablo 7.6'da test numunelerinin hazırlanacağı plakaların tümünden 5 adet tekrarlanacak numune kesilmesi sonucu 50 adet 3 noktalı eğme deney numuneleri, eğme dayanım değerleri sonucuyla belirlenen diğer 5 adet çekirdek malzemeye ait plakadan 5 adet tekrarlı numune kesilmesi sonucu 25 adet basma deney numuneleri olmak üzere toplamda 85 adet sandviç yapılı kompozit numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretim tamamlandıktan ve standartlara uygun olarak kesim işlemi yapılan deney numuneleri karakterizasyon için bazı mekanik deneyler uygulanmıştır. Tablo 7.7'de kompozit malzemelere uygulanan deneyler ve standartları belirtilmiştir.

Tablo 7.7 Üretilen kompozit numunelere uygulanan deneyler ve standartları

Deney İsmi	Standart Kodu
Basma Deneyi	ASTM C365/C365M-22
Eğme Deneyi	ASTM C393/C393M-20

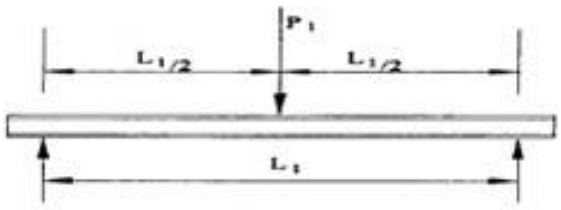
7.3.1 ASTM C393/C393M-20 Eğme Dayanım Deneyi

Eğme deneyi özellikle polimer matrisli kompozitlerde mekanik değerlendirme için kullanılmaktadır. Deney sonucunda deney numunesinin eğme dayanımı, çekirdekteki kayma gerilimi ve dış yüzeydeki eğme gerilim değerleri tespit edilebilmektedir.

Standartta 3 noktalı ve 4 noktalı eğme testlerini kapsamaktadır. Bu çalışmada 3 noktalı eğme testi yapılacaktır. Bu test yöntemi, uygulanan momentler, sandviç kaplama düzlemlerinin eğriliğini oluşturacak şekilde düz olarak eğilmeye maruz kalan düz sandviç yapıların özelliklerinin belirlenmesini kapsar.

Düz sandviç yapılı kompozitin üzerine uygulanan eğme testleri, sandviç eğme sertliğini, çekirdek kesme mukavemetini ve kesme modülü ile birlikte sandviç yapıdaki katmanların basma ve çekme mukavemetlerini belirlemek için de yapılabilir. Çekirdek kesme mukavemetini değerlendirmek için ve çekirdek malzemenin bağlarını değerlendirmek için de kullanılabilir.

Eğme testi için numuneler hazırlanırken kesiti en 75 mm boy 200 mm olacak şekilde plakalardan kesim işlemi gerçekleştirilmiştir. Her çekirdek malzemenin test edilmesi için malzeme başına 5 adet numune hazırlanmıştır.



Şekil 7.12 Tek noktalı yükleme

Yükleme fikstürlerini uygun şekil 7.12'de gösterildiği gibi düzenlenmiştir. Yükü, çelik çubuklar veya yükleme yastıkları ile bıçak kenarları aracılığıyla numuneye uygulanmıştır.

Şekil 7.13'de testin yapıldığı cihazı göstermektedir. Yükü, maksimum yükün 3 ile 6 dakika arasında gerçekleşmesine neden olacak sabit bir oranda uygulanmıştır.



Şekil 7.13 Mohr Federhaff AG marka eğme,basma ve çekme test cihazı

Bu test sonucunda geleneksel imalat yöntemleri ile üretilmiş olan çekirdek yapılarda malzemeye gelen kesme kuvvetine karşın gösterdiği davranışları tespit etmek, eklemeli imalat ile üretilen çekirdek yapılar için yine aynı davranışları tespit ederek geleneksel imalat ile üretilen çekirdek yapıların kıyaslanmasının sağlanması ve pal tasarımı için önemli bir kriter değer olan çekirdek kayma gerilimi ile eğme gerilim değerinin elde edilmesi amaçlanmaktadır.

7.3.2 ASTM C365/C365M-22 Basma Dayanım Testi

Basma dayanımı ve modülü, sandviç yapılı kompozitlerin tasarımında kullanılan çekirdek malzemelerin temel mekanik özellikleridir. Deformasyon verileri elde edilebilir ve tam bir yük-deformasyon eğrisinden herhangi bir yükteki (orantılı sınır yükte sıkıştırma gerilimi veya maksimum yükte sıkıştırma dayanımı gibi) sıkıştırma gerilimini hesaplamak ve çekirdeğin efektif modülünü hesaplamak mümkündür. Bu test yöntemi, sandviç yapılı kompozit tasarımı ve araştırma ve geliştirme amacıyla basma dayanımını ve modülünü elde etmek için standart bir yöntem sağlar. Basma testi için numuneler hazırlanırken kesiti en 60 mm boy 60 mm olacak şekilde plakalardan kesim işlemi gerçekleştirilmiştir. Her çekirdek malzemenin test edilmesi için malzeme başına 5 adet numune hazırlanmıştır.



Şekil 7.14 Numune yüzeyine doğru kapanmakta olan test fikstürü

Yükleme fikstürlerini temsili olarak şekil 7.14'de gösterildiği gibi düzenlenmiştir. Yükü, çelik çubuklar veya yükleme yastıkları ile numuneye uygulanmıştır. Yine aynı eğme deneyinde yapıldığı gibi şekil 7.13'deki Mohr Federhaff AG marka cihaz ile yapılmıştır. Basma testleri sırasında cihaz kapasitesi yetmemesi sonucunda 30 ton yük uygulayabilen farklı basma cihazında karbon fiber takviyeli poliamid 12 ve polieterimid numuneleri ayrı olarak tekrardan teste tabi tutulmuştur. Yükü, maksimum yükün 3 ile 6 dakika arasında gerçekleşmesine neden olacak sabit bir oranda uygulanmıştır.

Bu test sonucunda geleneksel imalat yöntemleri ile üretilmiş olan çekirdek yapılarda basma testi sonucu çekirdek malzemeye gelen kuvvete karşın gösterdiği davranışları tespit etmek, eklemeli imalat ile üretilen çekirdek yapılar için yine aynı davranışları tespit ederek geleneksel imalat ile üretilen çekirdek yapıların kıyaslanması ve pal tasarımı için diğer bir önemli değer olan sandviç yapılı kompozitin özgül basma dayanım değerlerini elde edilmesi amaçlanmaktadır.

7.4 Mikroskobik Görüntüleme

Mikroskobik görüntüleme Nikon marka eclipse ma100 model ters tip ışık mikroskobu ve Nikon marka smz645 model stereo mikroskobu ile yapılmıştır. Numuneler cihaza yerleştirilerek 5x'de odaklanarak numunelerin görüntüleri alınmıştır. Bu incelemeler sonucunda eğme ve basma testlerinde yapıya gelen yükler karşısında sandviç yapılı kompozit numunelerin yapı hasar türlerini kıyaslamak, çekirdek malzemelerin davranışsal türlerini belirlemek, peteksi yapılarda hücre tipi değişmesi sonucunda oluşan etkinin incelenmesi ve geleneksel imalat yöntemleri kullanılarak üretilmiş köpük yapılarla eklemeli imalat ile üretilen termoplastik çekirdek malzemelerin porozite etkisini tespit etmek amaçlanmıştır.

8
SONUÇLAR ve TARTIŞMA

8.1 Ağırlık Ölçüm Sonuçları

Ağırlık ölçümleri basma ve eğme deneylerine ait numuneler için ayrı ayrı yapılmış olup sonuçları aşağıdaki tablolarda verilmiştir. Ölçümler RADWAG marka AS 220.R2 model hassas tartıda yapılmıştır. Tablo 8.1'de eğme dayanım test numunelerinin ağırlık verileri verilmiştir.

Tablo 8.1 Sandviç yapılı kompozitlerin eğme deney numunelerinin ortalama ağırlık ölçümleri

Malzeme Kısa Kodu	S-PVC	S-PMI	S-PEI	S-PA12	S-AH-3.2-82	S-AH-3.2-80	S-AH-4.8-64	S-AGH-4.8-64	S-AH-4.8-64-A	S-AGH-4.8-64-A
Ortalama Ağırlık (g)	62,6	63,8	187,5	152,2	74,4	70,7	60,1	62,2	71,1	70,6
Standart Sapma	1,13	1,29	0,47	0,54	1,15	1,03	1,18	0,76	1,07	1,88

Tablo 8.2'de basma dayanım test numunelerinin ağırlık verileri verilmiştir.

Tablo 8.2 Sandviç yapılı kompozitlerin basma deneyi numunelerinin deney öncesi ağırlık ölçümleri

Malzeme Kısa Kodu	S-PVC	S-PMI	S-PEI	S-PA12	S-AH-3.2-82
OrtalamaAğırlık (g)	15,2	14,6	45,7	37,8	17,7

Tablo 8.2 Sandviç yapılı kompozitlerin basma deneyi numunelerinin deney öncesi ağırlık ölçümleri (devamı)

Standart Sapma	0,35	0,15	0,18	0,11	0,34

8.2 ASTM C393/C393M-20 Eğme Deneyi

Bölüm 7'de belirtilen ASTM C393/C393M-20 standardına uygun olarak kesilen ve test edilen sandviç yapılı kompozit numunelerden elde edilen sonuçları eğme deneyi sonuçları Tablo 8.3 'de belirtilmiştir. Yapılan testlerde mesnetler arası mesafe 160 mm olarak ayarlanmıştır.

Tablo 8.3 Sandviç yapılı kompozitlerin çekirdek malzeme tiplerine göre eğme deneyi sonuçları

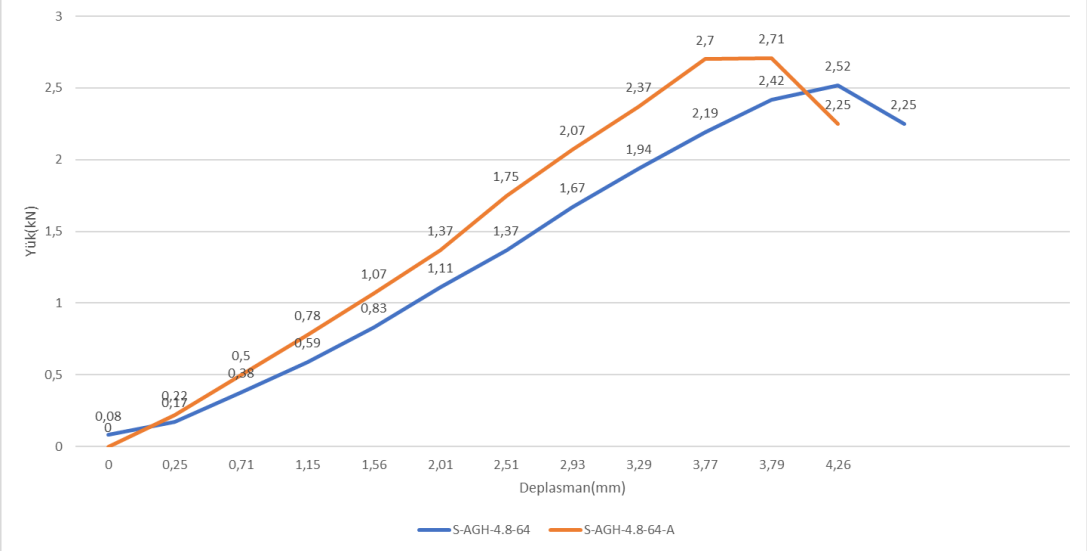
Çekirdek Malzeme	Sandviç Kompozit Kalınlığı (mm)	Sandviç Kompozit Genişliği (mm)	Çekirdek Malzeme Kalınlığı (mm)	Yük (N)	Çekirdek Kayma Gerilimi (MPa)	Dış Yüzeydeki Eğme Gerilimi (Mpa)
S-PEI	12	75	10	11820	7,16	286,55
S-PA12	12	75	10	8520	5,16	206,55
S-PVC	12,05	75	10	1700	1,03	40,12
S-AH-3.2-82	12,1	75,5	10	2740	1,64	62,56
S-AH-4.8-64-A	11,96	75,3	10	2530	1,53	62,45
S-AGH-4.8-64-A	11,86	75,2	10	2710	1,65	70,91
S-AH-4.8-64	11,92	74,96	10	2350	1,43	59,59

Tablo 8.3 Sandviç yapılı kompozitlerin çekirdek malzeme tiplerine göre eğme deneyi sonuçları (devamı)

S-AGH-4.8-64	12	74,89	10	2520	1,53	61,18
S-AH-3.2-80	12,1	75	10	3290	1,98	75,62
S-PMI	12,09	75	10	2360	1,42	54,53

Tablo 8.3'de verilen değerlere bakıldığında dış yüzeydeki eğme gerilimi ve çekirdek malzemeye ait kayma gerilmesinde maksimum dayanımı S-PEI kısa kodlu polieterimid çekirdek malzemesi ile imal edilen sandviç yapılı kompozit malzeme sağlamaktadır. Ağırlık başına elde edilen dayanım değerlerinde yine aynı çekirdek malzemeli kompozit ön plana çıkmaktadır.

Eğme dayanımı değerleri kullanılarak elde edilen, S-AGH-4.8-64-A ve S-AGH-4.8-64 çekirdek malzemeli sandviç kompozitlerin numunelerine ait yük/deplasman grafiği ise Şekil 8.1'de yer almaktadır.

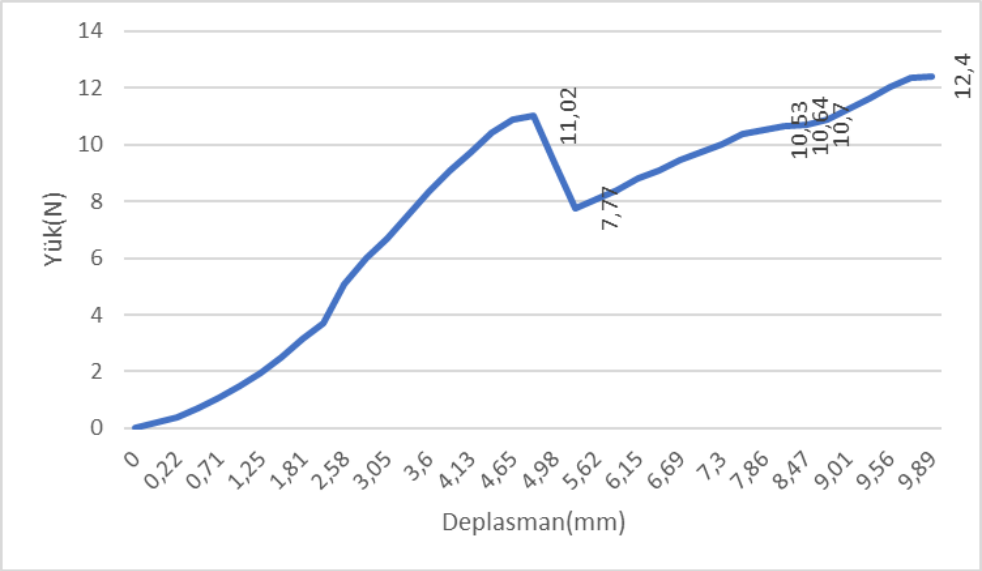


Şekil 8.2 S-AGH-4.8-64-A ve S-AGH-4.8-64 kısa kodlu sandviç yapılı kompozit numunelere ait yük/deplasman grafiği

Şekil 8.1 incelendiğinde S-AGH-4.8-64-A ve S-AGH-4.8-64 kısa kodlu sandviç yapılı kompozit numunelerde maksimum yükü taşıma kapasitesine sahip malzeme 2.71 kN'luk değer ile S-AGH-4.8-64-A olduğu tespit edilmiştir. Bu iki yapı arasındaki fark ise

çekirdek ve yüzey malzemeleri arasında bir adhezif film kullanılmasıdır. Bu durum bal peteği yapılı çekirdek malzemelerde, yüzey malzemeler ile çekirdek malzemenin arayüzey değerlerini iyileştirmek ve daha iyi yüzey tutuculuğu sahip olması amacıyla yapılmaktadır. Şekil 8.1'de de görüldüğü üzere eğme testinde maruz kalınan yükü taşıma kapasitesini arttığı tespit edilmiştir. Bu durumda bal peteği yapılarında arayüzeyi iyileştirmek amacıyla kullanılan adhezif film yapıya katkısının yanında yapıyı da ağırlaştırmaktadır. Tablo 8.3'te verilen değerler sonucunda peteksi yapılarda aşırı genişletilmiş peteksi yapılı (AGH) numuneler, hekzagonal peteksi yapılı (AH) numunelere kıyasla daha düşük yoğunlukta olmalarına karşın, sandviç yapılı kompozitlerindeki dayanım değerleri daha yüksektir. Bu durum hücre tipinin aşırı genişletilmiş olması ve numune boyunca yönelimli olarak mekanik özelliklerini arttırıcı bir etkinin olmasından kaynaklanmaktadır.

Tablo 8.3'de belirtilen verilerden yararlanılarak elde edilen, S-PEI numunesine ait yük/deplasman grafiği ise Şekil 8.2' de yer almaktadır.



Şekil 8.2 S-PEI kısa kodlu sandviç yapılı kompozit numuneye ait yük/deplasman grafiği

Elastik bölgede gerilme değerleri doğrusal olarak artar. Üç noktalı eğme konfigürasyonunda maksimum gerilme orta açıklıkta meydana gelir. Bu süreçte malzeme belirli bir eğilim gösterir ve maksimum gerilimin üzerinde, kompozit tabakalar ayrışarak kırılma meydana gelir. Şekil 8.2'de görüldüğü üzere 11,02 kN yük taşıma kapasitesine sahip S-PEI kısa kodlu sandviç yapılı kompozit bu noktada hasara uğramıştır. Ancak yükleme devam ettiğinde şekil 8.2'den de görüldüğü üzere çekirdek malzeme olarak kullanılan Ultem 1010 ticari isimli polieterimid malzemesi yükü taşımaya devam etmiş

olup 12,4 kN değerinde kırılmıştır. Bu durum kıyaslandığında çekirdek malzemesine kıyasla yüzey malzemesinin dayanımı daha düşük kalmıştır. Sandviç yapının tasarımında yüzey malzemesine bazı katların eklenmesi veya fiber yöneliminin değişmesi gerektiğini göstermektedir. Bu durum pale uygulanacak yüklere göre değişiklik gösterebilir. Ancak çekirdek malzemesi olarak kullanılan polieterimid'in sahip olduğu eter bağının sayesinde yapıya süneklilik katarken, yapısında bulunan aromatik imid sayesinde ise daha yüksek rijitliğe sahip olmasına neden olmaktadır. Bu sayede sandviç yapı hasar almasına karşın yapıda bulunan polieterimid emniyet katsayısını arttırıcı bir etken olduğu tespit edilmiştir.

8.3 ASTM C365/C365M-22 Basma Deneyi

Basma testi sonucunda, malzemelerin basma grafikleri elde edilmiştir. Basma diyagramının plastik deformasyonu gösteren kısmının ilk aşaması, eğme grafikleri plastik deformasyonu gösteren aşaması ile benzer durum ortaya koymaktadır. Ancak eğme grafiğinde maksimum değerden sonra gerilme değerlerinde azalma meydana gelirken, basma grafiğinde gerilme de artma meydana gelir ve basma eğrisinin eğiminde artış meydana gelir. Bu durum, basma sırasında numunenin kesit alanının devamlı artmasından kaynaklanır. Numunenin kesit alanı, özellikle plastik deformasyonun sonuna doğru büyük oranda arttığı için basma gerilmesinde ani yükselme meydana gelir.

Bölüm 7'de belirtilen ASTM C365/C365M-22 standardına uygun olarak kesilen ve test edilen sandviç yapılı kompozitlerden elde edilen basma deneyi sonuçları Tablo 8.4'de belirtilmiştir. Bu deney numunelerinde çekirdek malzeme kalınlığı 10 mm olup yükün uygulandığı yüzey alanı standart olarak 3600 m^2 olacak şekilde hazırlanmıştır.

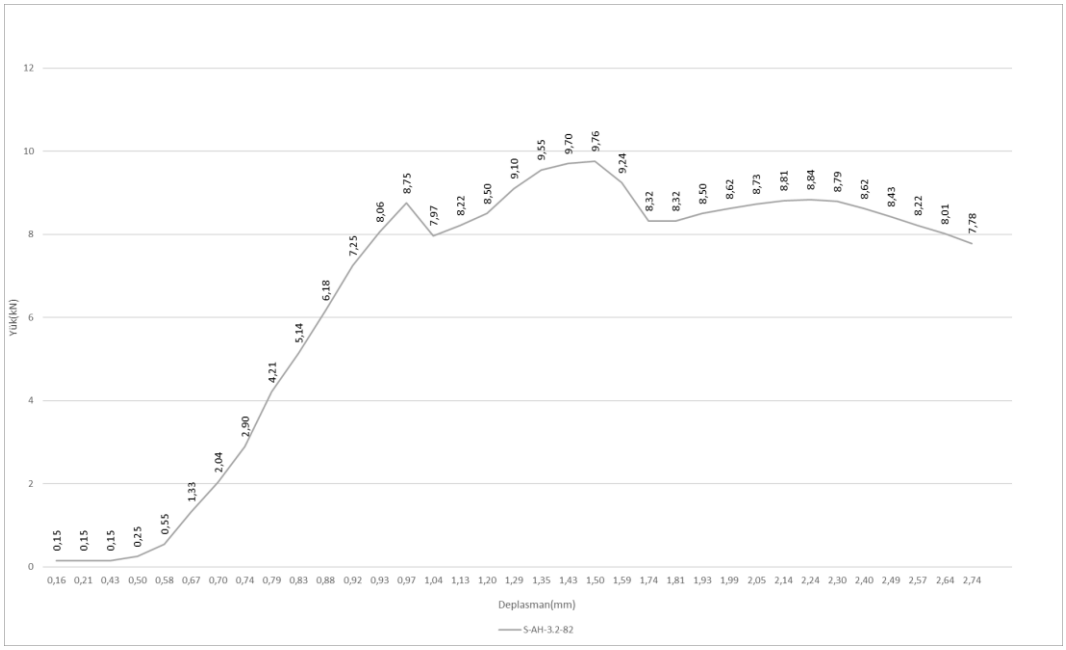
Tablo 8.4 Sandviç yapılı kompozitlerin kullanılan çekirdek malzeme tiplerine göre uygulanan yük ve basma dayanım değerleri

Çekirdek Malzeme	Uygulanan Yük (N)		Basma Dayanımı (MPa)	
	Ortalama	Maksimum	Ortalama	Maksimum
S-PEI	30000	30000	8,33	8,33
S-PA12	13844,7	15069,8	3,85	4,19
S-PVC	5570	6198	1,55	1,72
S-PMI	6764	6841	1,88	1,9
S-AH-3.2-82	9910	10973	2,75	3,05

Yukarıda verilen değerler doğrultusunda S-PEI kısa kodlu Ultem 1010 çekirdek malzemesin test cihazının sınır yüklemesine kadar ulaşmış yapıda gözle görülür bir

deformasyon gözlenmemiştir. Bu nedenle bu numuneler daha sonra 30 ton yük kapasitesine sahip başka bir basma test cihazında aynı teste tabi tutulmuş olup S-PA12 kısa kodlu Nylon 12CF ticari isimli poliamid 12 malzemede ise yapıda deformasyon gerçekleşmiş olup numune yan yüzeylerinden dışa doğru bombe vermiştir. Ancak S-PEI kısa kodlu sandviç yapıya ait numunelerde 30 tonluk maksimum yüklemeye rağmen yapı yükü taşımış ve yapısal bir hasar numunelerde tespit edilememiştir. Bu nedenle S-PEI numeneleri için Tablo 8.4 ve 8.5'de verilen maksimum ve ortalama basma dayanım değerleri 30 tonluk yükleme sonucundaki değerlerdir. S-PEI kısa kodlu sandviç yapılı kompozite ait numunelerin nihai sonuçlarını karşılamamaktadır.

Daha önceden yapılan çalışmalara göre yatay yönde basma testlerinin bal peteği çekirdek malzemesine sahip sandviç yapılı kompozit malzemelere uygulanması, petek hücre duvarı kalınlığı arttıkça çekirdek malzemesinin basınç dayanımının ve modülünün çekirdek kalınlığı ile arttığını göstermiştir [105]. Bu çalışmadaki basma ve eğme test değerleri karşılaştırıldığında bu çalışma ile uyumlu olduğu belirlenmiş olup aynı zamanda bal peteği kullanılan sandviç yapılarda incelendiğinde, belirli bir alanda hücre miktarının artması yani hücre genişliği azaldıkça mukavemet değerinin de arttığı eğme test sonuçlarında da tespit edilmiştir.



Şekil 8.3 S-AH-3.2-82 kısa kodlu sandviç yapılı kompozit numuneye ait yük/deplasman grafiği

Şekil 8.3'te S-AH-3.2-82 kısa kodlu sandviç yapılı kompozit numunelerden 2. test tekrarına ait yük/deplasman grafiği verilmiştir. Bu numuneye ait maksimum yük 8,75

kN'luk yüke dayandığı görülmektedir. Burada basma yüklemesinin ilk aşamasında hücre duvarlarının doğrusal olarak deforme olduğu gözlendi. Nihai mukavemeti sınırlayan lokal burkulma nedeniyle çekirdek hücre duvarları bükülme hareketi göstermiş olup maksimum yük seviyelerinden sonra nispeten ani bir çökme meydana geldiği tespit edilmiştir.

Maksimum yük seviyesinden sonra sandviç yapı hasara uğradı ve yük seviyesinde bir düşüş meydana gelmiştir. Düşüşün nedeninin hücre duvarlarının bükülmesi ve lokal burkulması olduğu gözlenmiştir. İlk düşüşten sonra yük küçük bir eğimle artmaya devam ettiği tespit edilmiştir. Bu bölgeye ait yük kapasitesindeki bu artış, katlanmış hücre duvarlarının yoğunlaşmasından kaynaklanmaktadır. Bu sonuçlar literatür ile paralel bir nitelikte olup çekirdek malzemelerin yapısı gereğinde doğal bir oluşumudur [105], [106].

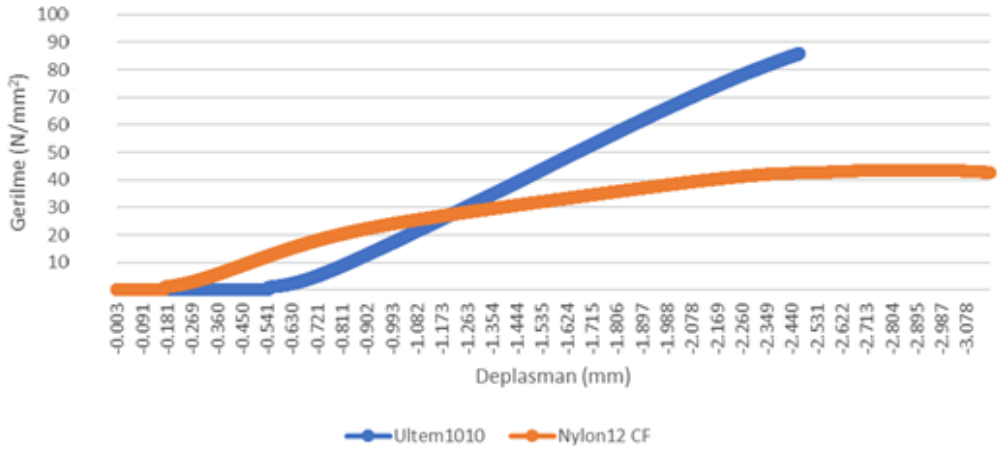
Basma deneyinin sonucunda yapıları ağırlıkları üzerinden değerlendirirsek ağırlık başına en iyi basma dayanım değerini S-AH-3.2-82 kısa kodlu bal peteği yapısındaki çekirdek malzemeye ait olduğu tespit edilmiştir. Bu durum özgül dayanım değerlerinede yansımış olup Tablo 8.5'te sandviç yapılı kompozitlerin kullanılan çekirdek malzeme tiplerine göre basma dayanım değerleri verilmiştir.

Tablo 8.5 Sandviç yapılı kompozitlerin kullanılan çekirdek malzeme tiplerine göre basma dayanım değerleri

Sandviç Yapılı Kompozit Kısa kodları	Basma Dayanımı (MPa)		Özgül Basma Dayanımı (kN.m/kg)	
	Ortalama	Maksimum	Ortalama	Maksimum
S-PVC	1,55	1,72	4,17	4,63
S-PMI	1,88	1,9	5,12	5,17
S-AH-3.2-82	2,75	3,05	7,40	8,21
S-PEI	8,33	8,33	6,06	6,06
S-PA12	3,85	4,19	2,98	3,24

Tablo 8.5 incelendiğinde en yüksek basma değeri S-PEI kısa kodlu Ultem1010 ticari isimli çekirdek malzemeye sahip sandviç yapılı kompozittin üstün olduğunu görmekteyiz. Diğer bir taraftan özgül basma dayanımları incelendiğinde S-AH-3.2-82 kısa kodlu bal peteği çekirdek yapıya sahip sandviç yapılı kompozitin daha düşük ağırlıkla daha üstün basma dayanım değeri elde edilebildiğini göstermektedir. Bu tabloda en düşük özgül basma dayanımı optimum üretim parametreleri ile üretilen S-PA12 kısa kodlu Nylon 12CF ticari isimli poliamid 12 çekirdek malzemeden oluşan sandviç yapılı

kompozitte olduğu belirlenmiştir. Basma dayanımı değerleri kullanılarak elde edilen, sandviç yapılı kompozitlerden polieterimid ve karbon fiber takviyeli poliamid 12 çekirdek malzemeli numunelerin gerilme/deplasman grafiği ise Şekil 8.4'de yer almaktadır.



Şekil 8.4 S-PEI (Ultem 1010) ve S-PA12 (Nylon 12CF) kısa kodlu sandviç yapılı kompozit numunenin basma gerilimi/deplasman grafiği

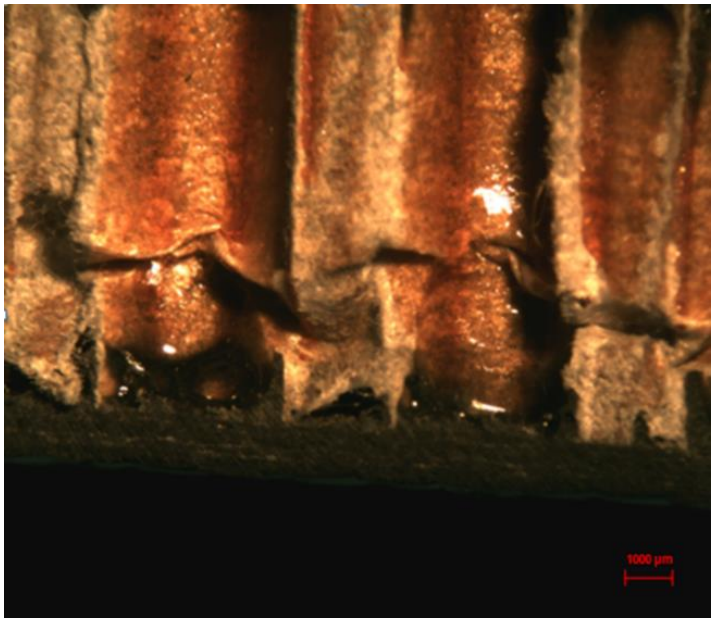
Basma deneyinde petek yapılı çekirdek malzemelerde enine kesme kırılması, köpük yapılı çekirdek malzemelerde ise ezilme görülmesine karşın karbon fiber takviyeli poliamid 12 (Nylon 12CF) malzeme, yapıda daha yüksek dayanıma sahip olmasıyla birlikte numunenin yan yüzeylerinde de dışa doğru eğilme vermeye başlamıştır. Bu deney şartları altında kullanılan basma test cihazının kapasitesinin yetersiz kalması sonucunda polieterimid (Ultem 1010) çekirdek malzemeli yapının basma deneyi tamamlanamamaktadır. Tüm bunlara rağmen polieterimid (Ultem 1010) malzemesi diğer malzemelere göre en fazla basma yüküne hasar almadan dayanmıştır. Aynı zamanda eğme deneylerinde de görüldüğü üzere, sandviç yapı hasar almasına karşın polieterimid (Ultem 1010) çekirdek malzemesi yükü taşımaya devam etmiştir. Bu durumun parça tasarımlarında emniyetli bir bölgede kalmak için toleransı arttırıcı bir etkisi olmaktadır.

Basma dayanımı sonuçlarına göre termoplastik çekirdek malzeme grubunda daha yüksek dayanım değerleri elde edilmiştir. Sonuçlar eğme dayanımı sonuçlarındaki gibi benzerlik göstermekte olduğu tespit edilmiştir. Nitekim özgül dayanım değerleri bazında incelendiğinde bal petekli çekirdek malzemeden oluşan sandviç yapılı kompozit numuneleri daha düşük yoğunlukta daha üstün mukavemet değerleri sunmakta olmasına karşın S-PEI kısa kodlu numunelerdeki polieterimid bazlı çekirdek malzemenin test cihaz kapasitesinin maksimum yüklemesi altında hasara uğramadığı veya yüzeysel

deformasyon gözlenmediği belirlenmiş olup nihai sonucunun tam olarak belirlenemese de daha üstün olacağı eğme test sonuçları ile kıyaslandığından da ön görülmektedir.

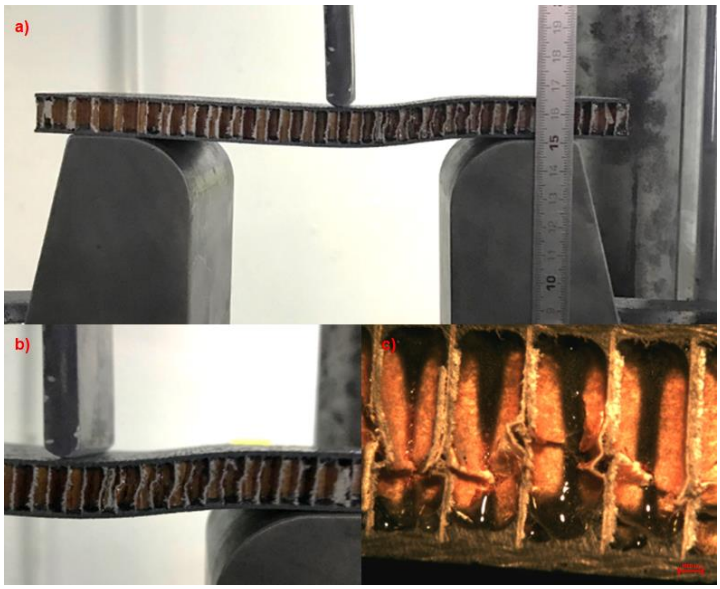
8.4 Mikroskobik Görüntüleme Sonuçlarının İncelenmesi

Çalışmada mikroskobik görüntüleme Şekil 7.15'de belirtilen ışık ve stereo mikroskop cihazlarından faydalanılarak yapılmıştır. Görüntüleme numunelerin kırılan yüzeylerinde ve 3 boyutlu yazıcılar tarafından üretilen çekirdek malzemelerinin yüzeyleri üzerinden yapılmıştır. Bu sebeple görüntüleme için çekirdek malzeme üretimi, eğme ve basma deneylerinin ardından elde ettiğimiz kırık yüzeye sahip deney numuneleri tercih edilmiştir. Elde edilen veriler aşağıda görseller halinde verilmiştir.



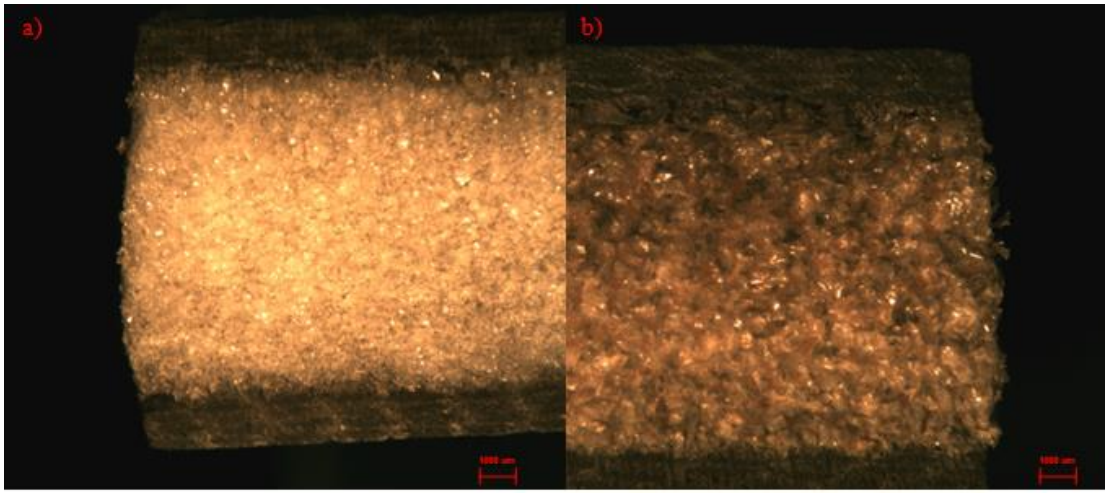
Şekil 8.5 S-AH-3.2-82 kodlu sandviç yapılı kompozit numunenin basma testindeki hasar görüntüsü

Şekil 8.5'de S-AH-3.2-82 kısa kodlu sandviç yapılı kompozit numuneye ait basma testi sonucunda oluşan yapı hasarı görüntüsü verilmiştir. Bu sandviç yapılı kompozit numune maksimum 8,75 kN değerinde yük taşırken yapı ilk hasara uğramıştır. Devam eden yükleme sürecinde Şekil 8.3'de verilen yük/deplasman grafiğinde belirlendiği üzere oluşan dalgalanma yapıdaki peteksi forma sahip olan çekirdek malzemenin yük altındayken hücre duvarları katlanmış ve yığılarak yoğunlaşan bir deforme olmasından kaynaklı olduğu Şekil 8.5'de verilen görüntüde de desteklediği tespit edilmiştir.



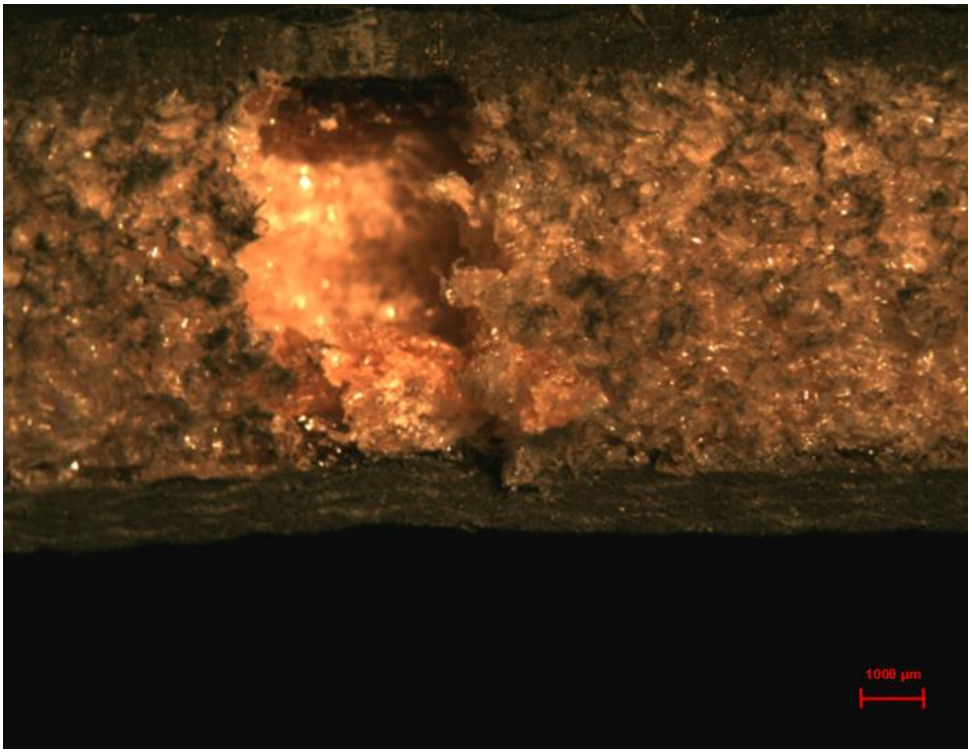
Şekil 8.6 S-AH-3.2-82 kodlu sandviç yapılı kompozit numunenin eğme testindeki hasar görüntüsü

Şekil 8.6'da a olarak gösterilen S-AH-3.2-82 kodlu sandviç kompozit numunenin yük altında hasara uğradığı andaki görüntüsü verilmiştir. c'de verilen görüntüsü ise yük kalktıktan sonra 5x'lik odaklama ile yapılan mikroskop altındaki görüntüsüne aittir. Bu görüntülerden yola çıkarak sandviç yapılı kompozitin dış yüzeyinde 62,56 MPa eğme geriliminde, 1,64 MPa çekirdek kayma gerilimine sahip olup çekirdek yapının aldığı hasarın enine kesme kırılması olduğu tespit edilmiştir. Bu tür hasarlar uygulanan yüke göre çekirdeğin veya sandviç yapının kalınlığının yetersiz olması durumunda ortaya çıkmaktadır.



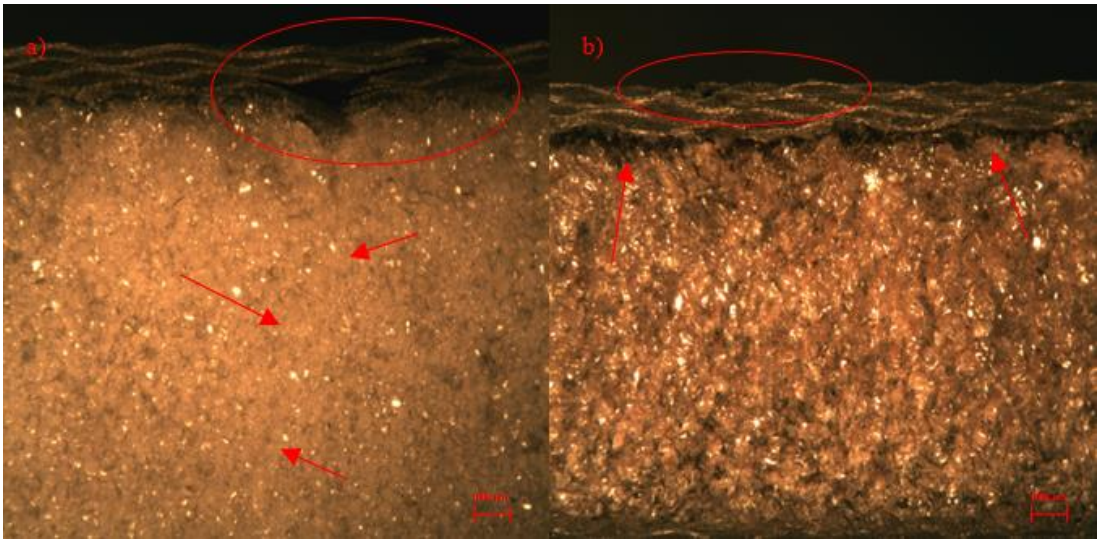
Şekil 8.7 S-PMI ve S-PVC numunelerinin basma testi sonrası kesit incelemesi a) S-PMI yan kesit görüntüsü b) S-PVC yan kesit görüntüsü

Şekil 8.7’de a ile gösterilen S-PMI kısa kodlu ve b de ise S-PVC kısa kodlu sandviç yapılı kompozit numunelerin basma testi sonrası yan kesitlerinin görüntüleri verilmiştir. S-PMI kısa kodlu numune 5,17 kN.m/kg özgül basma dayanımına sahipken, S-PVC kısa kodlu numune ise 4,63 kN.m/kg özgül basma dayanımına sahiptir. Yapıların deformasyon şekilleri içten dışa doğru eğim göstermekte olup sırasıyla 1,9 MPa ve 1,72 MPa maksimum basma dayanımına dayanmaktadır.



Şekil 8.8 S-PVC kodlu sandviç yapılı kompozit numunenin basma testinden sonucunda oluşan hasar görüntüsü

Şekil 8.7 ve 8.9’da görüldüğü üzere geleneksel imalat yöntemleri ile üretilen yapısal köpüklerin üretim esaslarından kaynaklanan düzensiz por yapılarınına sahip olmasına karşın, şekil 8.11’de gözlenen eklemeli imalat yöntemi ile üretilen S-PEI kısa kodlu numunelerde por yapısının düzenli ve kontrol altında tutulabildiği tespit edilmiştir. Kapalı hücre yapısına sahip S-PVC kısa kodlu numunenin düzensiz porozite sonucu yapıdaki üretim hatasından da kaynaklı olarak lokal reçinece zengin bölgeye sahip olması reçine emilimine sebep olmaktadır. Şekil 8.8’de görüleceği üzere S-PVC kodlu numuneye ait diğer bir kesitinde ise reçinece zengin bir bölgede gevrek bir yapı bozunması gözlenmektedir. Çekirdek malzeme basma kuvveti altında kesitinde dışa doğru boyun vermesi sırasında reçinece zengin ve gevrek yapılı lokal bir bölgesinden dışa doğru parça kopması gerçekleştiği tespit edilmiştir.

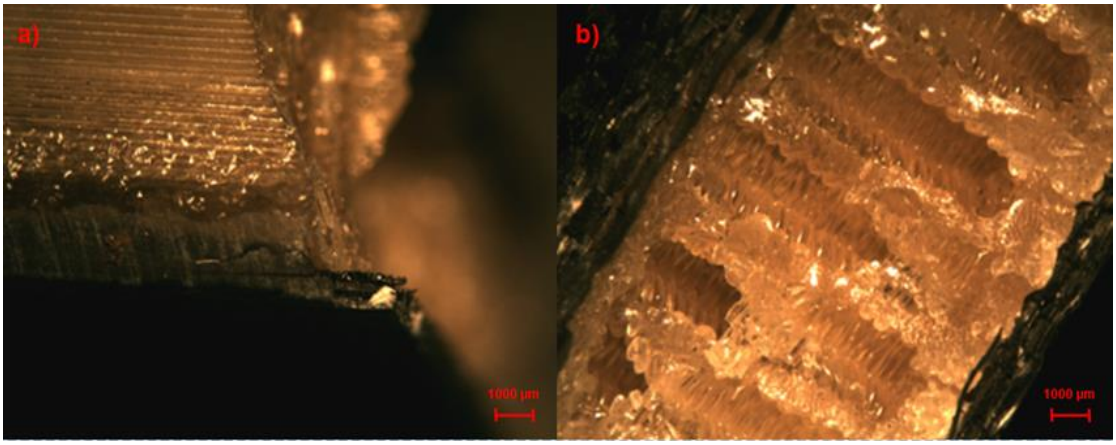


Şekil 8.9 S-PMI ve S-PVC numunelerinin eğme testi sonrası kesit incelemesi a) S-PMI yan kesit görüntüsü b) S-PVC yan kesit görüntüsü

Şekil 8.9'da a da S-PMI kısa kodlu, b de ise S-PVC kısa kodlu sandviç yapılı kompozit numunelerinin eğme testi sonrası görüntüleri verilmiştir. a görüntüsünde yüzeydeki karbon fiber takviyeli kompozit tabakanın gevrek bir davranış göstererek kırıldığı ve gelen yükü çekirdek malzeme olan polimetakrilimid bazlı malzemeye aktardığı bu malzemenin üst dış yüzeyde basma ve alt dış yüzeyde çekme kuvvetleri etkisi altında kalarak çekirdek malzeme üzerinde kesme kuvvetinin yüklenmesine sebep olmuştur. Tablo 8.3'de verildiği üzere dış yüzeye 2360 N yük yüklendiğinde dış yüzeyde oluşturduğu eğme gerilimi 54,53 MPa'a denk gelirken dış yüzey gevrek bir kırılmaya maruz kalarak elips içerisine alınan bölgede katlar arası kısmi bir delaminasyona sebebiyet verdiği görülmektedir. Bununla birlikte çekirdek malzemenin maruz kaldığı kayma gerilimi 1,42 MPa gelmektedir. Sandviç yapılı kompozit numune 4,35 mm deplasmanda maruz kaldığı yükler sonucunda üst yükleme noktasından başlayarak alt yüzeye uzanan çapraz doğrultulu çekirdek kırılma hasarı oluşmuştur. Kırılan bölge kırmızı renkli oklar ile belirtilmiştir.

Şekil 8.9'da b görselinde ise dış yüzeye 1700 N yük yüklendiğinde dış yüzeyde oluşturduğu eğme gerilimi 40,12 MPa'a denk gelirken dış katmanda yüzeysel bir hasar oluştuğu elips içerisine alınan bölgede görülmektedir. Bununla birlikte çekirdek malzemenin maruz kaldığı kayma gerilimi 1,03 MPa gelmektedir. Sandviç yapılı kompozit numune 9,89 mm deplasmanda maruz kaldığı yükler sonucunda karbon fiber takviyeli epoksi matrisli yüzey tabaka ile polivinil klorür bazlı köpüğün arayüzey

bağlarının zayıf olması ve yapının yüzey tabakaları ile çekirdek malzemenin farklı uzama kabiliyetlerine sahip olmasından kaynaklı olarak arayüzeyde yığılan gerilme sonucuna ayrılma gerçekleşmiş olup sandviç yapılı kompozit yükü taşımamıştır. Sandviç yapının taşıdığı yük ani düşüş göstererek 1300 N'a inerek 11,73 mm deplasmana çıkmıştır.



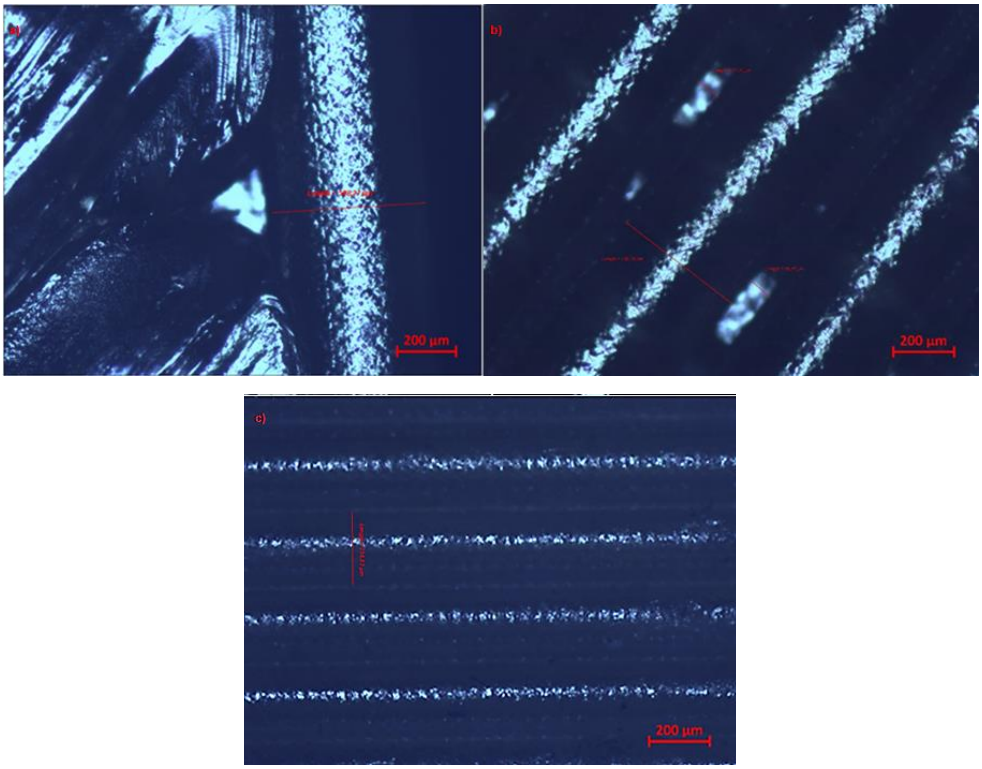
Şekil 8.10 S-PEI (Ultem 1010) numunesinin kırılan bölge incelemesi a) yan kesit görüntüsü b) ön kesit görüntüsü

Eğme testindeki yükleme, çekme, sıkıştırma ve kesme kuvvetlerinden oluşur. Laminatlar fiber yönü boyunca test edilmiştir ve genellikle eğme test sonuçlarında Tablo 8.3'te verilen S-PMI, S-PA12, S-PEI ve bazı bal petekli malzemelerde dış katta çekme yüzeyinde delaminasyon olarak kırılgan kırılma yaşadılar. Maksimum eğilme momenti nedeniyle numunenin ortasında delaminasyon başlar, çekme yüzeyinin orta kısmında fiber kopması meydana gelmiştir. Numunelerin hem çekme hem de basma yüzeylerinde delaminasyon gözlenmiştir. Literatürde benzer tip yapılarda farklı malzemelerde yapılan test sonuçları bu çalışmaya benzer nitelikte olup ilaveten fiber kopmasına kadar, büyük sapma değerleri de tespit etmişlerdir [107].

Çekirdek malzeme olarak kullanılan ticari kodu Ultem 1010 olan polieterimid içerikli sandviç yapılı kompozitin mikroskop altındaki 1000 µm'deki görüntüleri şekil 8.10'da verilmiştir. a'da görüntüsü verilen kırılma bölgesi incelendiğinde yüzey malzemesi olan karbon fiber takviyeli epoksi matrisli panelde delaminasyon göstererek bir kırılım gerçekleşmiştir.

Diğer bir taraftan petek yapılı ve yapısal köpük içeren sandviç yapılarda delaminasyon sonucu yüzey tabakalarda gevrek kırılmalar meydana gelmiştir. Ultem 1010 içerikli sandviç yapılı kompozitin çekirdek malzemesi ile yüzey malzemesinin bulunduğu tabakalar arasında bir ayrım hattı veya delaminasyona uğramış bir alan

gözlenmemektedir. Bu durum petek yapılı malzemelerin aksine yüzey tutunmasını arttırmak için polieterimid'li numunelerde harici bir adhezif film kullanımı gerektirmediğini ve ağırlık yönünden avantajlı bir tarafa çekilebileceğini kanıtlar niteliktedir.



Şekil 8.31 S-PEI kodlu numuneye ait çekirdek malzemenin 5x'deki yapı görüntüsü a)boşluk ve kontur b) tarama (raster) c) yan kesit görüntüsü

Şekil 8.11'de S-PEI kodlu numuneye ait çekirdek malzemenin 5x'deki yapı görüntüsü verilmiştir. Şekil 8.11'de a ve b'de verilen görüntülerde S-PEI kodlu sandviç kompozite ait polieterimid ile üretilen çekirdek yapının mikroskop altındaki incelemelerinde kontur genişliği 508.27 µm, tarama (raster) genişliğinin 438,29 µm olduğu tespit edilmiştir. Nozülün tarama (raster) hatları arası local bölgelerde oluşan boşlukların maksimum genişliği 87,20 µm olarak belirlenmiştir. c görüntüsünde ise katman kalınlığının yüksekliğinin 254,87µm olduğu görülmektedir.

Bu parametre sonuçları, GrabCAD Print yazılımında seçilen parametreler (kontur sayısı ve genişliği, tarama açısı) ile tutarlılık göstermiş olup aynı zamanda da Stratasys'in enduseparts isimli raporuna göre minimum porozite yapısı ve ideal takım yolu sağlanmıştır. Bu durumum maksimum mekanik dayanımın sağlandığı numunede gözlenmesi optimum mekanik dayanımı sağlayacak bir FDM mikroyapısının oluşturulduğunu kanıtlamaktadır.

8.5 Sonuç ve Öneriler

Aerodinamik yükleme altında geniş bir hız aralığında çalışan, daha hafif bir kompozit pervane palinin tasarımına yönelik optimum dayanım sağlamak amacıyla eklemeli imalat yöntemiyle üretilen Ultem 1010 (Polieterimid) ve Nylon 12CF (ağırlıkça %35 karbon fiber takviyeli Poliamid 12), geleneksel çekirdek malzeme olan genişletilmiş petek yapı, hekzagonal petek yapı, Polimetakrilimid (PMI) yapısal köpük, Polivinil klorür (PVC) yapısal köpük gibi çekirdek malzemeleri kullanılarak sandviç yapılı kompozitler üretilmiştir. Bu çalışmada kullanılan malzemelerin kimyasal yapı farkları olmaları göz önüne alınarak kıyaslamaları yapılmış olup aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

1) Sandviç yapılarda test sonuçları irdelendiğinde petekli yapılarda birim alanda hücre sayısının azalması, hücre boyutunun küçülmesi yapıdaki mukavemet değerlerini arttırıcı bir etkisinin olduğunu saptanmıştır. Bununla birlikte eğme deneyinde kıyaslaması yapılan petek yapılarında kullanılan adhezif film, sandviç yapının arttırdığı dayanım değerine karşın ağırlıktaki artış sebebiyle önemli bir katkısı olmamaktadır.
2) Polimetakrilimid bazlı yapısal köpük içeren sandviç yapılı kompozitler, Polivinil klorür yapısal köpük bazlı sandviç yapılı kompozitlere göre arayüzey kalitesi daha iyi olup sandviç yapı hesaplarına göre daha iyi yük aktarımı sağlanmaktadır. Bu durum eğme numunelerinde PVC köpük içeren numunelerin tümünde maksimum eğme gerilimi altında üst tabaka ile köpük arayüzeyinde ayrılmalar gerçekleşmiştir. Bu durum PMI köpük içeren numunelerde ise karşılaşılmayıp maksimum eğme gerilim altında üst dış tabakada oluşan gevrek kırılma sonucunda ya kayma gerilimine mağruz kalıp kesme hattında çapraz kırılma gerçekleşmiş yada gevrek kırılan dış katman köpük yüzeyine batarak lokal ezilme yaratıp yapıyı hasara uğratmıştır.
3) Geleneksel imalat yöntemleri ile üretilen yapısal köpüklerin üretim esaslarından kaynaklanan düzensiz por yapılarınına sahip olmasına karşın, eklemeli imalat ile üretilen 3 boyutlu yazıcı malzemelerine ait numunelerde por yapısının düzenli ve kontrol altında tutulabildiği tespit edilmiştir. Bu durum reçine veya nem emilimi konusunda hassasiyete ve yapı kusurlarının optimize edilmesine yarar sağlamaktadır. Homojen bir por dağılımı olduğundan daha homojen bir dayanım katkısı da sağlanmaktadır.

4) Özgül basma dayanım değerleri karşılaştırıldığında Ultem 1010 ticari isimli polieterimid sandviç yapı (S-PEI) ile petekli sandviç yapı (S-AH-3.2-82) ön plana çıkmaktadır. S-AH-3.2-82 kodlu yapı maksimum basma dayanımı altındaki değerde hücre duvarlarında katlanmalar tespit edilmiş olup sandviç yapının hasar almasından sonraki maksimum değerini ve dayanım değerlerindeki dalgalanmaların sebebi buna bağlanmıştır. S-AH-3.2-82 kodlu yapı daha yüksek özgül mukavemete sahip olsa da S-PEI kodlu yapının basma testinde test cihazının maksimum yüklemesine kadar hasar almaması durumundan dolayı nihai sonucunun elde edilememesi ve eğme dayanım değerlerindeki üstünlüğü önemli bir noktadır.
5) Çekirdek malzemesi olarak kullanılan polieterimid'in sahip olduğu eter bağı yapıya süneklilik katarken, yapısında bulunan aromatik imid sayesinde ise daha yüksek rijitliğe sahip olmasına neden olmaktadır. Bu durumda sandviç yapı hasar almasına karşın yapıda bulunan polieterimid'in kullanılması, emniyet katsayısını arttırıcı bir etken olduğu tespit edilmiştir. 3 boyutlu imalat yöntemiyle farklı tasarımda, doluluk oranlarında üretilebilme imkanı neticesinde çekirdek malzeme uygulamalarında ön plana çıkmaktadır.
6) Kompozit pal için önemli bir malzeme özelliği olan eğme mukavemeti açısından sandviç yapılı kompozitler incelendiğinde Ultem 1010 ticari isimli polieterimid malzemesi diğer malzeme türlerine göre ön plana çıkmaktadır.
7) Tüm bu sonuçlar gözden geçirildiğinde kompozit pal imalatı için tercih edilen sandviç yapılı kompozit malzemelerde çekirdek malzemesi olarak Ultem 1010 ticari isimli polieterimid malzemesinin kullanılması uygun görülmektedir. Ancak tüm bunlara rağmen bu çalışmada nihai basma testinin gerçekleştirilememiş olmasından kaynaklı olarak özgül basma dayanımında düşük değerde kalması, çekirdek malzemenin yüksek doluluk oranında üretilmesi nedeniyle de oluşan yüksek yoğunluğu dezavantaj olarak yansımaktadır. Bu durum optimizasyon çalışması yapılması halinde düzeltilebileceği ön görülmüştür.
8) Hava araçlarına ait farklı bölümlerinde kullanılan peteklerin boyutu ve tipindeki değişiklikler, tasarımcılara işlevsel olarak özelleştirilmiş kompozit yapılar oluşturma konusunda daha fazla esneklik sağlayarak, en iyi performansı sağlayan optimize edilmiş bir yapıyla sonuçlanır. Farklı boyut ve şekillerdeki hücresel yapıların performansı, geleneksel petekli yapılardan daha iyi yapıların üretilmesini sağlar. Bununla birlikte, tek biçimli hücre yapılarının aksine, farklı

boyut ve şekillerdeki yapıların geleneksel yöntemler kullanılarak imal edilmesi zordur. Bu nedenle eklemeli imalat, özelleştirilmiş model ve boyutlardaki yapıları kolayca üretebilme avantajına sahiptir. Bu yaklaşım ile, gövde, kanat ve pervane pali gibi İHA yapıları optimize edilip bölgesel olarak gelen kuvvete karşı özel olarak tasarlanmış ve boyutlandırılmış bal peteği yapılar tasarlanıp bu yöntem ile üretilebilir. Özetle, işlevsel olarak geliştirilmiş hücresel yapıların, eklemeli imalat ile kolayca üretilebileceği sonucuna varılabilir. Bu durum seri imalatta yüksek miktarlarda üretimi gerçekleşen kompozit pervane pallerinde çekirdek malzeme üretimi için önemli bir avantaj sağlayacaktır. Dayanım ve hafiflik gereken yerlerde bölgesel olarak yapıya etki eden kuvvet analiz edilerek karmaşık tasarımlar 3B yazıcı ile üretilip kullanılabilir. 3B yazıcı ile üretilen parçalar yakın gelecekte nihai parça üretimlerinde de önemini artırarak devam edecek ve yapılan çalışmalar sonucunda eksiklikler giderilerek seri imalata aktarılması kolaylaşacağı ön görülmektedir.

9) Bu çalışmadaki test sonuçlarının neticesinde elde edilen veriler kompozit pervane palinin imalatına yönelik malzeme geliştirilmesi açısından önemli değerleri ortaya koymasının yanında nihai tespit için yeterli olmadığı belirlenmiştir. Bu nedenle ileri ki çalışmalarda ASTM C297, ASTM C273, ASTM C364-99, ASTM D1781-98 ile ASTM D7136M-12 standartlarına uygun testler yapılacaktır. Mekanik testlerin yanında termal özelliklerini incelemek için DSC testi yapılacaktır. Kompozit pal tasarımı ve bu tasarıma yönelik Ultem 1010 ticari isimli polieterimid çekirdek malzemesinin yanında çeşitli 3B yazıcı malzemelerinde uygun kafes tasarımı, optimum proses şartlarını, oryantasyonunu ve yoğunluğunu belirleyerek geliştirmelere devam edilecektir. Bununla birlikte önceden belirlenen standart kesitli bir palin üretiminin bu belirlenen proseslere göre üretilip yine aynı kesite sahip palin geleneksel yöntem ile üretilmiş halini mekanik testler ile kıyaslaması ve analiz methodunun geliştirilmesi planlanmaktadır.

KAYNAKÇA

[1] S. Jangam, S. Verma ve K. Ramesha, Design and Structural Mechanics of a Modified Wood – Composite Integrated Propeller Blade, Proceedings of the First International Conference on Advanced Scientific Innovation in Science, Engineering and Technology, Chennai, 2020.

[2] R. McCarthy, G. Haines ve R. Newley, A Polymer composite applications to aerospace equipment, Composite Manufacturing Vol 5, 1994, pp. 83-93.

[3] P. T. Maung, B. G. Prusty, A. W. Phillips ve N. A. S. John, Curved fibre path optimisation for improved shape adaptive composite propeller blade design, 2020.

[4] H. Park, Advanced turboprop composite propeller design and analysis using fluid–structure interaction method, Composites Part B: Engineering, 2016, pp. 111-119.

[5] F. Tumer ve E. Demirkesen, Carbon Fiber-Polymer Matrix Composites, İstanbul, 2000.

[6] 3D Printing and Additive Manufacturing Global State of the Industry, Wohlers Report, 2022.

[7] D. Godec, J. Gonzalez-Gutierrez, A. Nordin, E. Pei ve J. U. Alcázar, A Guide to Additive Manufacturing, Springer, 2020, pp. 196-199.

[8] I. Gibson, D. W. Rosen ve B. Stucker, Additive Manufacturing Technologies Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing, Springer, 2010.

[9] T. Boissonneault, Aerospace AM Insights From the stratosphere to space, 3dpbm, 2022.

[10] R. McCarthy, G. Haines ve R. Newley, A Polymer composite applications to aerospace equipment, Composite Manufacturing Vol 5, 1994, p. 85.

[11] E. Morozov, S. Sylantiev ve E. Evseev, Impact damage tolerance of laminated composite helicopter blades, Composite Structures, cilt 62, no. 3-4, pp. 367-371, 2003.

[12] Y.-J. Lee ve C.-C. Lin, Optimized Design of Composite Propeller, Mechanics of Advanced Materials and Structures, pp. 17-30, 2004.

[13] B. Agarwal ve L. Broutman, Analysis and Performance of Fiber Composites, cilt 95, John Wiley & Sons, 1980, pp. 138-139.

[14] D. Hull ve T. Clyne, An Introduction to Composite Materials, Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

[15] J. Qu, The effect of slightly weakened interfaces on the overall elastic properties of composite materials, Mechanics of Materials, cilt 14, no. 4, pp. 269-281, 1993.

[16] Y. Şahin, Kompozit malzemelere giriş, Ankara, Gazi kitabevi, 2000, pp. 28-96.

[17] K. Landry, S. Kalogeropoulou ve N. Eustathopoulos, Wettability of carbon by aluminum and aluminum alloys, Materials Science and Engineering: A, cilt 254, no. 1-2, p. 99–111, 1998.

[18] ASM Handbook Composites, ASM International, USA, 2001.

[19] D. Cratchley, Powder Metall, 1963, p. 59–72.

[20] R. B. BHAGAT, Metallurgical Transactions A, 1985.

[21] R. BHAGAT, Low cycle fatigue behavior of aluminum/stainless steel composites, AIAA Journal, 1984.

[22] M. O. Seydibeyoglu, A. Mohanty ve M. Misra, Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 2017, pp. 51-79.

[23] J. Aboudi, S. Arnold ve B. Bednarcyk, Micromechanics of Composite Materials: A Generalized Multiscale Analysis Approach, Butterworth-Heinemann, 2012.

[24] G. Newaz, Advances in Thermoplastic Matrix Composite Materials, Philadelphia: ASTM, 1989.

[25] S. Mazumdar, Composite Manufacturing Materials, Product and Processing Engineering, Boca Raton: CRC Press, 2002.

[26] F. C. Campbell, Structural Composite Materials, Ohio: ASM International, 2010.

[27] H. T. KAPRANOS P., Comprehensive Materials Processing, cilt 5, 2014, pp. 3-37.

[28] L. Carlsson ve D. Adams, Basic Experimental Characterization of Polymer Matrix Composite Materials, Polymer Reviews, 2013.

[29] K. Chawla, Composite Materials Science and Engineering, New York: Springer, 2011.

[30] D. G. Baydar, Sürekli Cam Fiber Takviyeli Polipropilen Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu, İstanbul, 2011.

[31] B. Beşergil, Kompozitler Temel İlkeler Test Metotları, Ankara, Gazi Kitabevi, 2016, pp. 40-43.

[32] M. Bhuiyan, M. Hosur ve S. Jeelani, Low-velocity impact response of sandwich composites with nanophased foam core and biaxial (±45°) braided face sheets, Composites Part B: Engineering, cilt 40, no. 6, pp. 561-571, 2009.

[33] H. Lei, K. Yao, W. Wen, H. Zhou ve D. Fang, Experimental and numerical investigation on the crushing behavior of sandwich composite under edgewise compression loading, Composites: Part B, cilt 94, p. 34–44, 2016.

[34] K. Güler, Uçak Yapımında Kullanılan Malzemeler ve Özelliklerinin İncelenmesi, İstanbul, 2003.

[35] M. B. Karamış, A. Taşdemirci ve F. Nair, Composite Materials Used in Aviation and Application Examples, Kayseri: Kayseri 3rd Aviation Symposium, 2000.

[36] D. G. Rethwisch ve W. D. C. JR., Materials Science and Engineering An Introduction, Wiley, 2018, p. 623.

[37] M. Akay, An introduction to polymer-matrix composites, Mustafa Akay & bookboon.com, 2015.

[38] A. Rudin ve P. Choi, The Elements of Polymer Science and Engineering, San Diego: Academic Press, 1999.

[39] Guide to Composite gurit, Gurit.

[40] R. Ebewele, Polymer Science and Technology, Boca Raton: CRC Press, 2000.

[41] D. H., An Introduction to Composite Materials, Cambridge: Cambridge University Press, 1991.

[42] H. Dodiuk ve S. Goodman, Handbook of Thermoset Plastics, San Diego: William Andrew, 2013.

[43] S. H. Goodman, Handbook of Thermoset Plastics, California: Raytheon System Company, 1998.

[44] C. Augustsson, Nm Epoxy Handbook, Ytterby: Nils Malmgren Ab, 2004.

[45] D. Ratna, Handbook of Thermoset Resins, Shrewsbury: iSmithers Rapra Publishing, 2009.

[46] CTP Kalıplama Metotları, 2016.

[47] F. Wallenberg ve B. A.A., Fiberglass and Glass Technology Energy-Friendly Compositions and Applications, Springer Science, 2010.

[48] A. Circiumaru, V. Bria, I. Roman, G. Andrei, D. Dima ve I. Birsan, Physical Properties of Filled Epoxy Composite, Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium, Vienna, 2011.

[49] P. Deogonda ve V. Chalwa, Mechanical Property of Glass Fiber Reinforcement Epoxy Composites, International Journal of Scientific Engineering and Research, cilt 1, no. 4, 2013.

[50] A. Shrivastava, Introduction to Plastics Engineering, Elsevier, 2018.

[51] Y. Bingöl, Karbon-Fiber Takviyeli Polimer Matrisli Kompozit Bisiklet Kadrosu Üretimi, İstanbul, 2008.

[52] P. Mallic, Fiber Reinforced Composites Materials, Manufacturing and Design, Boca Raton: CRC Press, 2007.

[53] M. Mohamed, S. Anandan, Z. Huo, V. Birman, J. Volz ve K. Chandrashekhara, Manufacturing and characterization of polyurethane based sandwich composite structures, Composite Structures, cilt 123, pp. 169-179, 2015.

[54] L. Gibson ve M. Ashby, Cellular solids: structure and properties, Advances in Polymer Technology, cilt 9, no. 2, pp. 165-166, 1988.

[55] I. Gibson ve M. Ashby, The mechanics of three-dimensional cellular materials, Proceedings of The Royal Society a Mathematical, Physical and Engineering Sciences, cilt 382, no. 1782, p. 43–59, 1982.

[56] D. Weaire ve S. Hutzler, The physics of foams, Oxford: Oxford University Press, 1999.

[57] M. Scheffler ve P. Colombo, Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications, Wiley, 2005.

[58] V. Rizov, A. Shipsha ve D. Zenkert, Indentation study of foam core sandwich composite panels, Composite Structures, cilt 69, no. 1, p. 95–102, 2005.

[59] A. Shipsha, S. Hallström ve D. Zenkert, Failure Mechanisms and Modelling of Impact Damage in Sandwich Beams A 2D Approach: Part I Experimental Investigation, Journal of Sandwich Structures and Materials, cilt 5, no. 1, pp. 7-31, 2003.

[60] A. Shipsha, S. Hallström ve D. Zenkert, Failure Mechanisms and Modeling of Impact Damage in Sandwich Beams A 2D Approach: Part II Analysis and Modeling, Journal of Sandwich Structures and Materials, cilt 5, no. 1, pp. 33-51, 2003.

[61] D. Zenkert, A. Shipsha ve K. Persson, Static indentation and unloading response of sandwich beams, Composites Part B Engineering, cilt 35, no. 6-8, pp. 511-522, 2004.

[62] M. C.-Y. Niu, Composite Airframe Structures, Hong Kong Conmilit Press Ltd, 2005.

[63] N. Gupta, Characterization of syntactic foams and their sandwich composites: modeling and experimental approaches, LSU Doctoral Dissertations, 2003.

[64] S.J. Grunewald, 3DPrint.com, [Çevrimiçi]. Available: https://3dprint.com/118719/stratasys-custom-material/. [Erişildi: 8 February 2016].

[65] Stratasys, Stratasys, [Çevrimiçi]. Available: https://www.stratasys.com/en/resources/case-studies/lockheed-martin/. [Erişildi: 26 January 2022].

[66] Boom Supersonic Drill Guides, [Çevrimiçi]. Available: https://www.stratasys.com/contentassets/59f67b96fdd542d5bd753f6a825f04bb/uc_fdm_au_boom-drill-guides_0921a.pdf?v=48f963. [Erişildi: 29 December 2021].

[67] R. Brooke, AM TECHNOLOGY NEWS, Stratasys, [Çevrimiçi]. Available: https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/survey-copter-flies-to-stratasys-for-3d-printing-of-uav-syst/. [Erişildi: 24 May 2013].

[68] A. Pearson, Aurora Uav 3d Printing, Stratasys, [Çevrimiçi]. Available: https://www.stratasys.com/en/resources/blog/aurora-uav-3d-printing/. [Erişildi: 24 March 2020].

[69] Technology overview polymer Additive Manufacturing, AMPOWER, [Çevrimiçi]. Available: https://ampower.eu/infographics/polymer-additive-manufacturing/.

[70] H. K. Sürmen, Eklemeli imalat (3B baskı): teknolojiler ve uygulamalar, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, cilt 24, no. 2, p. 379, 2019.

[71] D. Bourell, J. P. Kruth, M. C. Leu, G. Levy, D. Rosen, A. M. Beese ve A. T. Clare, Materials for additive manufacturing, CIRP Annals- Manufacturing Technology, cilt 66, no. 2, 2017.

[72] Technology Deep Dive: Filament based Material Extrusion, AMPOWER Report, [Çevrimiçi]. Available: https://additive-manufacturingreport.com/technology/polymer/filament-based-material-extrusion/.

[73] Stratasys Ltd., FDM for Composite Tooling 2.0: DESIGN GUIDE, [Çevrimiçi]. Available: https://aerospace.stratasys.com/assets/downloads/composite-tooling/Design_Guide_Large-FDM_for_Composite_Tooling_2.0.pdf. [Erişildi: 2017].

[74] M. Srinivas ve S. Babu, A Critical Review on Recent Research Methodologies in Additive Manufacturing, Materials Today: Proceedings, cilt 4, no. 8, pp. 9049-9059, 2017.

[75] AMFG, The Additive Manufacturing Landscape 2020, [Çevrimiçi]. Available: www.amfg.ai. [Erişildi: 2020].

[76] Stratasys, Stratasys Materials Testing Procedure, [Çevrimiçi]. Available: https://www.stratasys.com/siteassets/materials/materials-catalog/fdm-materials/antero_840cn03/br_fdm_materialstestingprocedure_0121a.pdf?v=48e0fa. [Erişildi: 2021].

[77] O. A. Mohamed, Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects, Advances in Manufacturing, cilt 3, no. 1, pp. 42-52, 2015.

[78] J. Gulanova, L. Gulan, I. Kister ve N. Kacer, Precision and Strength Comparison of Various AM Technologies in View of their Applicability in the Automotive Industry, Proceedings of CAD'19, Singapore, 2019.

[79] M. Kutz, Applied Plastics Engineering Handbook, Elsevier, 2011.

[80] C. Pandelidi, T. Maconachie, S. Bateman ve M. Leary, Parametric study on tensile and flexural properties of ULTEM 1010 specimens fabricated via FDM, Rapid Prototyping Journal, cilt 27, no. 2, pp. 429-451, 2021.

[81] Stratasys Inc., Technical Application Guide, 2015. [Çevrimiçi]. Available: https://aerospace.stratasys.com/assets/downloads/metal-forming/Tech_App_Guide-FDM_Tooling_for_Sheet_Metal_Forming_LARGE_Hydroforming_and_Rubber_Pad_Press_EN_2.pdf. [Erişildi: 2011].

[82] Thinglab, Stratasys FDM Nylon-CF10 3D Printing Material, [Çevrimiçi]. Available: https://thinglab.com.au/3d-printing-materials/stratasys-f123-series-materials/stratasys-fdm-nylon-cf10-3d-printing-material/. [Erişildi: 2023].

[83] Stratasys Ltd., FDM Best Practice: FDM Support Removal, [Çevrimiçi]. Available: https://ase.au.dk/fileadmin/www.ase.au.dk/Filer/Laboratorier_og_vaerksteder/MakerLab/BP_FDM_SupportRemoval.pdf. [Erişildi: 2016].

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. G. Canbay ve B. Özbay Kısasöz ve K. Altuğ Güler ‘‘Sandviç Yapılı Kompozitlerde Çekirdek Malzemenin Mekanik Davranışlara Etkisinin İncelenmesi’’, 10. Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi, İstanbul, 2022.